EL CICLO VITAL DE LAS GALAXIAS • LA ESPERANZA EN UN VIAL



AGOSTO 2002
5 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ESPINTRONICA

Rasgos geniales

Un fuerte romano en el desierto de Egipto

Los estrógenos y el sistema vascular





Agosto de 2002 Número 311

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNACIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

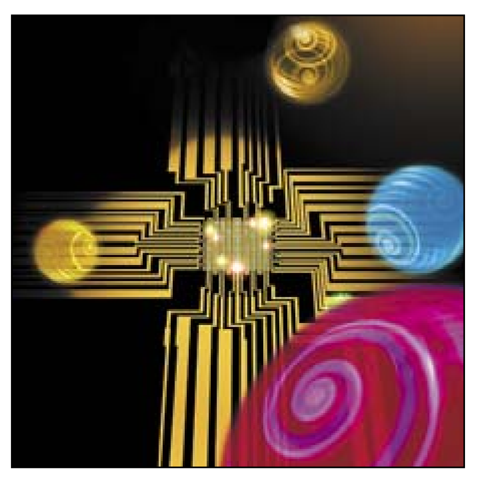
GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisót., centro, izda.
28009 Madrid
Tel. 914 097 045
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *El turbador comportamiento de los orangutanes*; Esteban Santiago: *Vacunas contra el sida*; M.ª Rosa Zapatero: *El ciclo vital de las galaxias*; José M.ª Fullola: *Un fuerte romano en el desierto de Egipto*; Juan Pedro Adrados: *Espintrónica*; José Manuel García de la Mora: *Rasgos geniales*; Luis Bou: *La complejidad del café* y *Aventuras problemáticas*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Slim Films

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

AGRICULTURA QUÍMICA. «En marzo de 1951, el gobierno iraní solicitó a EE.UU. ayuda inmediata para una emergencia. A lo largo del golfo Pérsico se estaban formando enjambres de langostas a tal velocidad, que amenazaban con destruir la totalidad de las cosechas. EE.UU. envió aviones militares y diez toneladas de aldrina, insecticida con el que rociaron la zona. La operación aniquiló las langostas en una noche. Por vez primera en la historia, se atajó una plaga de langosta a escala nacional en sus mismos inicios. Este episodio ilustra la revolución que la química ha provocado en la agricultura. Gracias a la química agrícola, aún en su infancia, la productividad de los campos progresará al menos tanto como avanzó gracias a las máquinas en los últimos 150 años.» [*Nota de la redacción: La Convención de Estocolmo de las Naciones Unidas de 2001 prohibió la producción de aldrina y otros contaminantes orgánicos persistentes.*]

...cien años

MÁSCARAS DE LA COSTA DEL PACÍFICO. «Estas ilustraciones muestran unas curiosas máscaras de los indios de la tribu tghimpsean [tsimshian], de la costa del Pacífico de la Columbia Británica, a orillas del río Skeena. Fueron obtenidas por el reverendo doctor Colby, misionero metodista que ejerció entre ellos. Esto Falsos Rostros [*sic*] podrán verse ahora en el museo del Colegio Victoria, de Toronto.»

PESCA DE ESPONJAS. «Hace centenares de años que el comercio conoce las esponjas griegas y turcas. Las de más fina calidad quizá sean las sirias. Pero durante los últimos quince años la producción ha disminuido grandemente a causa de la introducción por los griegos, en el decenio de 1870, de un aparato de buceo que se mostró ruinoso para pescadores y pesquerías. La 'escafandra' permite al buceador permanecer una hora bajo el agua. Es una pesada carga para los bancos de esponjas, pues con ella se recolecta todo lo que está a la vista, esponjas grandes y pequeñas, y la nueva cosecha tarda años en madurar.»

TIEMPOS MODERNOS. «Ya es un lugar común atribuir a las prisas y tensiones de la moderna vida urbana la mitad de las enfermedades que afligen hoy al cuerpo. Sin embargo, los niños se enfrentan más fácilmente a las nuevas necesidades de la vida; nuevas circunstancias que asombraron e inquietaron a sus padres se convierten en hábitos llevaderos. Podemos así imaginar a futuras generaciones que guardarán una perfecta calma entre centenares de teléfonos y dormirán tranquilamente mientras sobre sus cabezas zumben aeronaves entre innumerables cables eléctricos y un perpetuo tráfico nocturno de vehículos de motor resuene al otro lado de las ventanas de sus dormitorios. Hasta ahora, hay que confesarlo con pesar, nuestros sistemas nerviosos no están tan encallecidos.»



Máscaras de los indios de la costa del Pacífico, 1902

...ciento cincuenta años

GUERRA NAVAL. «Las recientes experiencias de la armada francesa con el propulsor de hélice han disipado las dudas acerca de la superioridad que comporta reunir el vapor y las velas en los barcos de guerra. El viaje de pruebas del *Charlemagne*, que viajó hasta los Dardanelos con vuelta a Tolón, rebasó todas las expectativas. Un encontronazo entre barcos franceses y americanos, con los primeros empleando vapor y velas y los nuestros sólo velas, sería una lucha de lo más desigual. La ventaja sería toda para los franceses, pues podrían barrer a voluntad las cubiertas de su adversario y atacarlo por todos los costados.»

LOBOS TEMEROSOS. «Se dice que desde que se terminó el ferrocarril que atraviesa el norte de Indiana, los lobos procedentes del norte, cuyas manadas salvajes asolaban el sur, no han sido vistas allende la vía. Se supone que las bestias desconfían de ella, tomándola por una trampa, y no se aventuran en las cercanías de los carriles.»

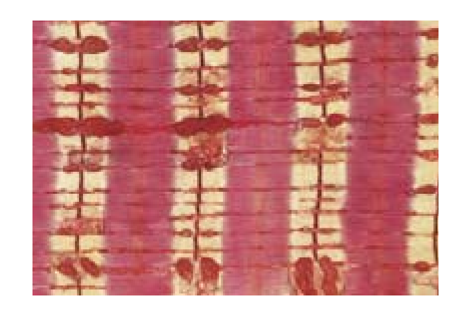
APUNTES

BIOLOGIA CELULAR

Mejorar sin esfuerzo

Las mitocondrias son las microscópicas centrales que abastecen de energía a toda actividad humana; cuantas más posee una célula, más vigorosa es. El ejercicio puede elevar su número. Ahora parece que cierta proteína desencadena el mismo efecto.

Unos investigadores del Hospital Clínico de la Universidad del Sudoeste de Texas, en Dallas, observaron los músculos de unos ratones sedentarios que se fatigaban en seguida. Descubrieron que una enzima, la CaMK, aumentaba en ellos los niveles de mitocondrias. Un fármaco que promoviese la creación de mitocondrias podría ayudar a los pacientes postrados en cama a disfrutar de los beneficios del ejercicio. El rendimiento físico de los seres humanos, conjeturan, mejoraría con una alteración de la actividad genética que aumentase la producción de esa proteína. *—Charles Choi*



Las fibrillas musculares se vigorizan con más mitocondrias (manchas marrones sobre las estructuras verticales)

ASTRONOMIA

El sistema planetario de 55 Cancri

Los primeros planetas descubiertos en torno a otras estrellas tenían características singulares: su masa era del orden de la de Júpiter, giraban, sin embargo, muy cerca de su sol. Ahora podría haberse dado con uno que nos resultaría más familiar. Tras medir entre 1989 y 2002 los desplazamientos Doppler de los espectros de la componente principal del sistema binario 55 Cancri, una estrella muy rica en metales y no muy diferente en tamaño y edad del Sol, el grupo encabezado por G. Marcy y P. Butler ha llegado a la conclusión de que un planeta gigante gira a su alrededor a una distancia de 5,5 unidades astronómicas, con una excentricidad moderada. (Una unidad astronómica es la distancia media entre la Tierra y el Sol.) Ocupa una posición parecida a la de Júpiter en el sistema solar; pesa, al menos, cuatro veces más. Nunca antes se había hallado un planeta que orbitara a esas distancias jovianas. Como ha aflorado en una muestra de 50 estrellas, no parece que se trate de un caso muy raro. A 0,11 unidades tiene 55 Cancri otro planeta gigante, el cuarto extrasolar que se conoció, descubierto ya por Butler, Marcy y sus colaboradores en 1996; es posible que haya un tercero, a 0,24 unidades. Este sistema es compatible con la presencia de un cuarto cuerpo, rocoso, del tamaño de la Tierra, que girase establemente a una distancia de 55 Cancri como la que media entre nosotros y el Sol.

EVOLUCION HUMANA

Alimentos y pensamiento

La gordura de los recién nacidos nos hace únicos entre los mamíferos terrestres. Hay una buena razón para esas rechoncheces: cuando nacemos, el cerebro humano (que llega a un tamaño mucho mayor que el del chimpancé, nuestro pariente más próximo) demanda más del 60 por ciento del consumo energético corporal; las reservas de grasa son, pues, vitales para las épocas de escasez. Curiosamente, a los 50 días los fetos de los chimpancés y de otros primates tienen unos cerebros del mismo tamaño que los de los fetos humanos. Parecen, pues, poseer un potencial embrionario de amplio desarrollo cerebral comparable. Pero ¿por qué sólo los seres humanos aprovechan esa posibilidad? En algún punto de la evolución humana debió de haber mutaciones genéticas que promovieron la abundancia de grasa fetal necesaria para la expansión del cerebro, expuso Stephen Cunnane, de la Universidad de Toronto, en la reciente Conferencia Anual de la Asociación Americana de Antropología Física. Pero, comentó también, para aprovechar tales mutaciones nuestros ancestros necesitaron una dieta de gran calidad y una forma de vida lo bastante sedentaria como para facilitar que se acumulase la grasa.



En la costa se acumulan calorías en abundancia

De ordinario se cree que la primitiva evolución humana tuvo lugar en la sabana y en zonas boscosas. Sin embargo, aduce Cunnane, sólo los entornos costeros habrían brindado con suficiente seguridad unos recursos abundantes a unos hambrientos homínidos que no podían todavía cazar. En asentamientos así habrían tenido fácilmente a su disposición presas acuáticas ricas no sólo en calorías, sino también en yodo, ácidos grasos omega y otros nutrientes esenciales para el desarrollo del cerebro. El respaldo arqueológico de esta hipótesis resulta por ahora insuficiente.

—Kate Wong

QUEST *Photo Researchers, Inc. (arriba)*; L. CLARKE *Corbis (abajo)*

BOTANICA

El alga del gingko

La especie *Gingko biloba* es el único superviviente del orden de las *gingkoalas*, que tuvo su apogeo a finales del Jurásico y principios del Cretácico, hará unos 150 o 200 millones de años. Este fósil viviente es un árbol contemporáneo de los dinosaurios. Sus hojas bilobuladas están dispuestas en forma de abanico, vestigio de su lejano pasado. Resiste a los insectos, a la contaminación atmosférica e incluso a la radiación: uno sobrevivió a la destrucción nuclear de Hiroshima. Alcanza edades extraordinarias: el más viejo, que se encuentra en el templo Dinlisi, en la provincia china de Shandong, tiene 3000 años. Ahora, Jocelyne Trémouillaux-Guiller, de la Universidad François Rabelais de Tours, ha descubierto que un alga unicelular vive en las células del gingko. Es la primera vez que se encuentra un alga en las células de un vegetal superior.

HOJAS DE *GINGKO BILOBA*

CLOROPLASTO

GOTAS DE LIPIDO

El citoplasma del alga que reside en las células del Gingko biloba *contiene un cloroplasto voluminoso y muchas gotas de lípido*

Se la descubrió primero en células cultivadas del *gingko*. Mide de tres a cinco micras y es eucariota. Prolifera en las células que necrosan: al multiplicarse, las infla hasta reventarlas; las nuevas algas quedan entonces liberadas en el medio exterior.

Más tarde, se detectó el endosimbionte en células vivas de *Gingko biloba.* Reside permanentemente en ellas, parece que en una forma inmadura, sin actividad fotosintética. No está presente en todos los árboles, ni en todas sus partes, ni en todos los tipos celulares.

Por último se identificó el alga gracias a su ARN ribosómico. Pertenece a la clase de las *Trebuxiofitas.* Guarda una estrecha relación con *Coccomyxa*, alga unicelular componente de ciertos líquenes.

ECOLOGIA

Ranas y platelmintos

Puede que la investigación haya acertado con dos de los factores que contribuyen a la disminución de la población mundial de ranas. Pieter T. J. Johnson, de la Universidad de Wisconsin-Madison, Andrew R. Blaustein, de la Universidad estatal de Oregón, y sus colaboradores han observado que la frecuencia y la severidad de las deformaciones comunes entre las ranas de algunas partes del oeste de Estados Unidos dependen únicamente de la presencia del platelminto parásito *Ribeiroia ondatrae.* Sus portadores son los caracoles acuáticos, cuyo número, según los investigadores, quizás esté multiplicándose a causa de los nutrientes que arrastra la escorrentía, entre otras razones. Por si eso fuera poco, cuando unos biólogos de la Universidad de California en Berkeley bañaron renacuajos macho en el fertilizante atrazina, los batracios tendieron a desarrollar órganos sexuales femeninos en los testículos; sus órganos vocales, además, eran más pequeños. Podría ello deberse a que la atrazina convierte la testosterona en estrógeno, si bien sus efectos en la reproducción aún no están claros.

—J. R. Minkel



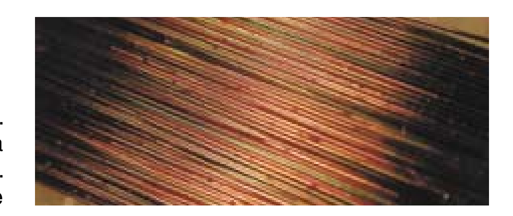
¿Son los platelmintos responsables de deformidades de las ranas?

FOTONICA

Bellos hilos

Algún día, la vestimenta no se limitará a reflejar nuestra personalidad. Expertos en ciencia de los materiales, adscritos al Instituto de Tecnología de Massachusetts, han construido hilos de polímero recubiertos con espejos. Para ello depositaron una sustancia vítrea, el triseleniuro de arsénico, sobre un polímero, que luego enrollaron, creando así una estructura estratificada de cristal fotónico. Estirados, los rollos se convierte en largos hilos de unas pocas centenas de micras de grueso, reflectoras como el oro. Estas fibras son algo más que lentejuelas. Sus cualidades reflectoras se ajustan variando el diámetro del hilo. Debidamente estiradas y tejidas, podrían confeccionarse con ellas trajes antirradiación, etiquetas ópticas de códigos de barras y filtros flexibles para telecomunicaciones.

—Philip Yam



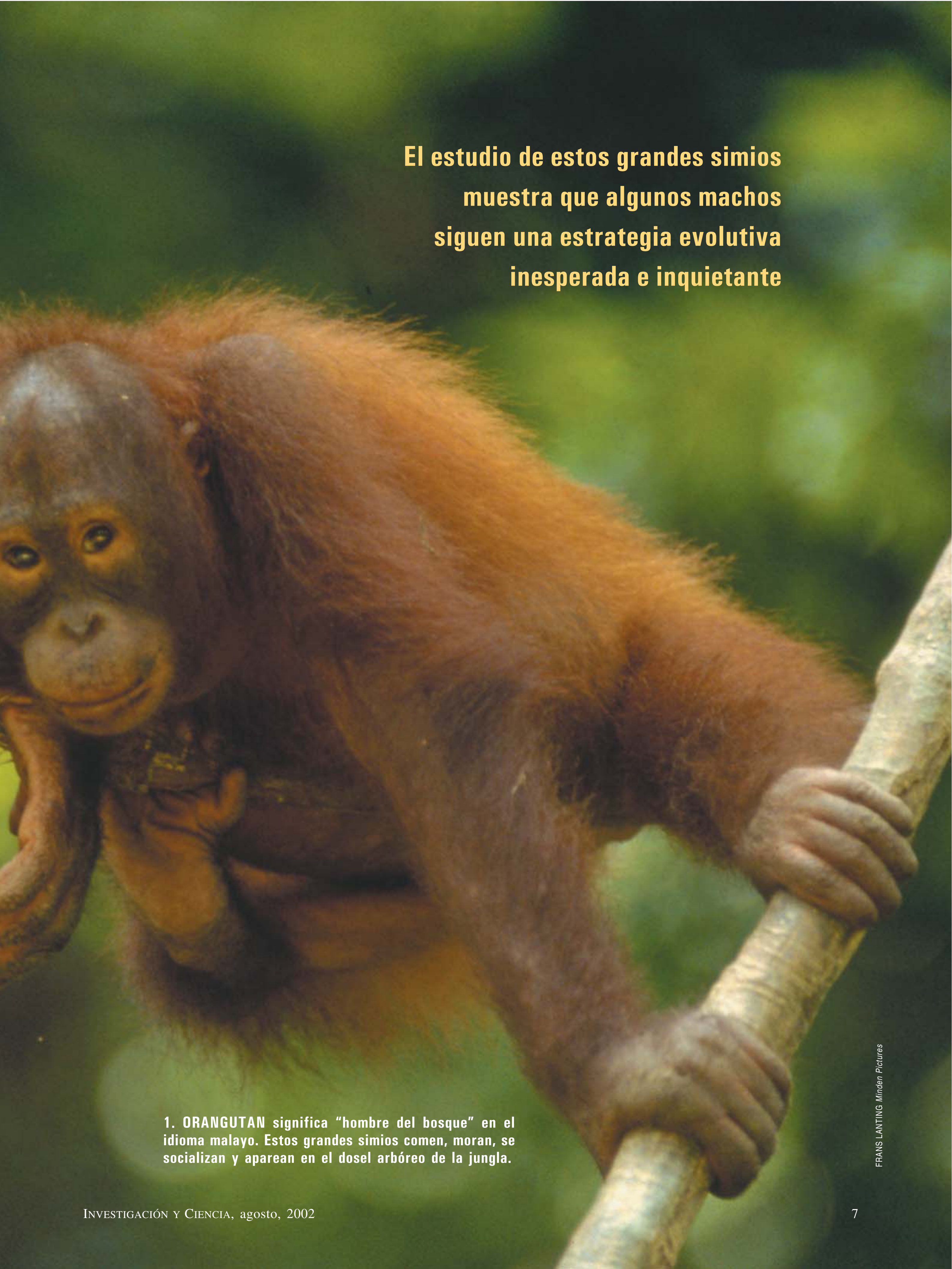
Los hilos de cristal fotónico tienen un grosor de 0,2 mm

J. TREMOUILLAUX-GUILLER (*arriba*); FRANS LANTING *Minden Pictures* (*centro*); FINK RESEARCH GROUP *M.I.T. Y AAAS* (*abajo*)

El turbador comportamiento de los orangutanes

Anne Nacey Maggioncalda y Robert M. Sapolsky

El orangután, *Pongo pygmaeus*, uno de los cuatro grandes simios (con el gorila, el chimpancé y el bonobo), es un pariente cercano del ser humano. Su adaptación a la vida en la bóveda arbórea de las islas sudasiáticas de Borneo y Sumatra (ningún otro gran simio reside fuera de Africa) es perfecta. Con sus grandes brazos y manos como garfios se balancea de un árbol a otro en busca de frutos tropicales. Sorprende la diferencia de tamaño entre machos y hembras: el peso medio de un macho adulto, alrededor de 90 kilogramos, dobla con creces el de la hembra. No hay gran primate más solitario.



El estudio de estos grandes simios muestra que algunos machos siguen una estrategia evolutiva inesperada e inquietante

1. ORANGUTAN significa “hombre del bosque” en el idioma malayo. Estos grandes simios comen, moran, se socializan y aparean en el dosel arbóreo de la jungla.

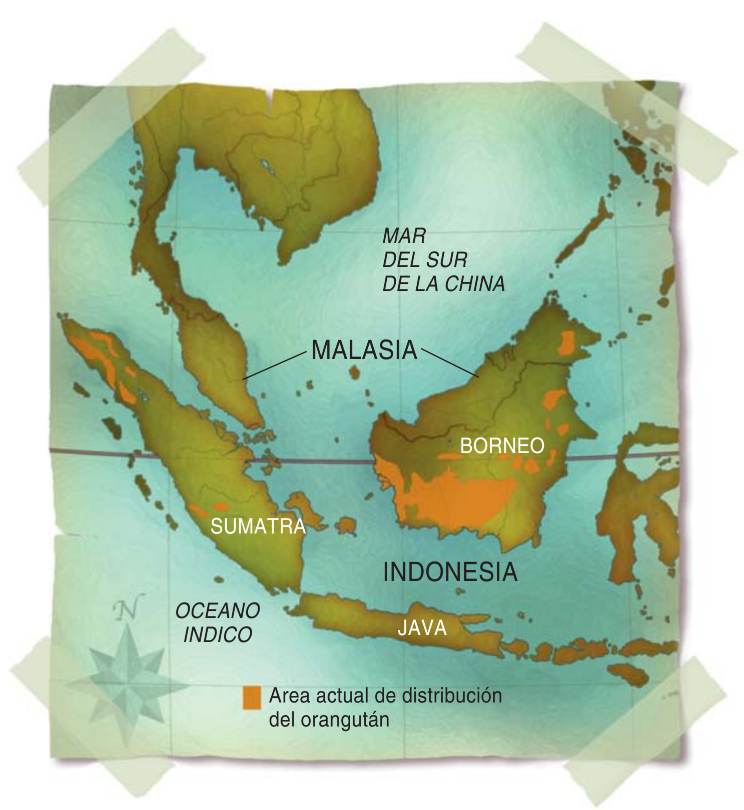
FRANS LANTING *Minden Pictures*

Impresiona un macho adulto de orangután. Posee un par de amplias almohadillas, o rebordes, en las mejillas y un saco gular bien desarrollado con el que emite fuertes gritos, o “llamadas largas”. El pelo que le cubre cuerpo y cara es largo y de color brillante. Estos rasgos son caracteres sexuales secundarios, llamativas señales que los orangutanes macho ostentan para proclamar su fertilidad y sus buenas condiciones físicas ante el sexo opuesto. Se les desarrollan en la adolescencia. Los machos alcanzan la pubertad entre los siete y nueve años de edad. Después pasan unos cuantos años en un estadio “subadulto”, durante el cual su aspecto dista de ser imponente y no son mayores que una hembra madura. Los machos alcanzan el tamaño adulto y exhiben los rasgos sexuales secundarios hacia los 12 o 14 años de edad. O, al menos, esto es lo que se pensaba.

A medida que se fueron estableciendo en los zoológicos grupos sociales permanentes de orangutanes, quedó claro que un macho adolescente podía permanecer como subadulto, en un estado de desarrollo interrumpido, hasta cerca de los veinte años. En la década de 1970, la observación de los orangutanes de las pluviselvas del sudeste asiático por Biruté M. F. Galdikas, de la Universidad Simon Fraser, de la Columbia Británica, y otros arrojó el mismo resultado: a veces, los machos se quedaban en adolescentes de desarrollo interrumpido durante una década o más, alrededor de la mitad de su vida reproductora. Fascina una variabilidad de esta magnitud; es como encontrar una especie en la que el embarazo durara entre seis meses y cinco años.

Los biólogos se interesan en los casos de desarrollo interrumpido porque iluminan los procesos de crecimiento y maduración. La causa es en ocasiones un trastorno genético (por ejemplo, una mutación en el receptor de un factor de crecimiento causa en los seres humanos una forma de enanismo). Los factores ambientales también pueden frenar o detener el desarrollo de un organismo. La escasez de alimento retarda la maduración de los seres humanos y de muchos otros animales; se trata de una reacción lógica desde un punto de vista evolutivo: si no está claro si se va a sobrevivir otra semana, no tiene sentido malgastar calorías añadiendo masa ósea o desarrollando caracteres sexuales secundarios. La anorexia o los ejercicios intensísimos de gimnastas y bailarinas retrasan en ocasiones la pubertad.

Sin embargo, entre los orangutanes macho parece que la causa del desarrollo interrumpido reside en el ambiente social del animal. La presencia de machos adultos dominantes retrasa la maduración de los adolescentes que viven en el mismo entorno que ellos. Hasta hace poco, se creía que se trataba de una patología inducida por el estrés; es decir, que los orangutanes adolescentes dejaban de desarrollarse porque los machos adultos los amedrentaban. Pero en los últimos años, nuestros estudios apuntan que el desarrollo interrumpido entre los orangutanes no es una patología, sino una estrategia evolutiva adaptativa. Los machos adolescentes de desarrollo interrumpido pueden preñar a las hembras; al permanecer pequeños e inmaduros (en



2. CIENTOS DE MILES de orangutanes recorrían el sudeste asiático hará unos 10.000 años, pero en la actualidad sólo se los encuentra en algunas partes de Borneo y Sumatra. Su número se ha reducido a menos de 20.000. Dada la velocidad a la que hoy se los caza y destruye su hábitat, se calcula que en un par de decenios ya no los habrá en estado salvaje.

lo que se refiere a los caracteres sexuales secundarios) minimizan la cantidad de comida que necesitan y reducen el riesgo de conflicto grave con los machos adultos. Pero hay en la estrategia de estos adolescentes de desarrollo interrumpido un aspecto turbador: fuerzan a las hembras a copular con ellos. En otras palabras, las violan.

Medición del estrés

Se observaron primero grupos de orangutanes cautivos. Terry L. Maple, de Zoo Atlanta, y otros biólogos que trabajaban en parques zoológicos vieron que el desarrollo de los machos adolescentes permanecía detenido si había un macho maduro en su instalación. Si se trasladaba a este macho dominante, los adolescentes empezaban enseguida a desarrollarse. Este tipo de regulación social se había observado ya en otras especies. Entre los mandriles, por ejemplo, los machos socialmente dominantes desarrollan caracteres sexuales secundarios espectaculares –unos testículos de mayor tamaño, niveles de testosterona elevados—; los subordinados no experimentan esos cambios. En las musarañas arborícolas y en muchas especies de roedores, a los subordinados se les retrasa la pubertad. La caza furtiva de elefantes ha dejado recientemente

en determinadas zonas de Africa machos huérfanos que crecen sin apenas socialización. Cuando se hallan en el frenesí del celo, se vuelven muy agresivos y peligrosos. Algunos zoólogos han sugerido una solución efectiva: introducir machos mayores, dominantes, en la región, porque su presencia suprime el frenesí de los solitarios.

En todos estos casos, los investigadores están por lo general de acuerdo en que el estrés de la subordinación explica la interrupción del desarrollo. Durante un momento de estrés (una carrera, digamos, a través de la sabana para huir de un depredador), el mamífero moviliza la energía para impulsar los músculos e inhibe diversos proyectos de construcción a largo plazo del cuerpo, entre ellos el crecimiento, la reparación de tejidos y las funciones reproductoras. Es la lógica de la prioridad: durante la emergencia al animal sólo le importa sobrevivir; después, si es que hay un después, reanudará las tareas del largo plazo. Pero cuando un animal experimenta un estrés crónico, como el causado por la subordinación social, priorizar puede tener consecuencias adversas: que disminuya el crecimiento, se rebaje el nivel de hormonas sexuales, se reduzca la fertilidad y se retrase la pubertad. El estrés psicológico severo y prolongado llega incluso a detener el crecimiento de los niños que padecen el raro síndrome del enanismo psicogénico.

A primera vista, también parece que los orangutanes macho adolescentes se hallan sometidos a un estrés crónico. Los machos adultos son sumamente agresivos con los adolescentes, sobre todo en el espacio limitado de un zoológico. En la naturaleza, los machos se hallan dispersos y solitarios; defienden con vigor un territorio grande, que abarca los territorios de varias hembras, una especie de harén disperso. Pero hasta en la naturaleza son los adolescentes bien conscientes de la amenazadora presencia de un macho maduro. Una de las señales que la revela es un olor almizcleño que los machos adultos esparcen por todo su territorio; anuncian además su presencia las llamadas largas. John C. Mitani, de la Universidad de Michigan, ha comprobado que estos gritos resonantes se oyen a kilómetros de distancia.

Sin embargo, no había habido mucho empeño en verificar si el estrés de hallarse cerca de un macho dominante inducía o no cambios hormonales que detuviesen el desarrollo de los adolescentes. Desde 1989 buscamos una manera de examinar las hormonas de los orangutanes adolescentes con el desarrollo interrumpido; nos proponíamos así determinar si se hallaban de verdad bajo un estrés crónico. Lo ideal habría sido medir los niveles de las hormonas pertinentes en la sangre de los orangutanes, pero era imposible, por razones éticas y prácticas, así que sacamos partido de que el nivel medio en la sangre de varias hormonas se refleja de forma aproximada en la orina. Obtener orina de animales salvajes habría sido dificilísimo, de modo que estudiamos poblaciones cautivas. Gracias a la generosa ayuda de cuidadores, conservadores y veteri-

Los autores

ANNE NACEY MAGGIONCALDA y ROBERT M. SAPOLSKY estudian desde hace más de diez años la evolución de las estrategias reproductivas de los orangutanes macho. Maggioncalda, doctora en antropología biológica y anatomía por la Universidad de Duke en 1995, es profesora del departamento de ciencias antropológicas y del programa de biología humana de la Universidad de Stanford, así como del departamento de anatomía de la facultad de medicina de esa misma universidad. Sapolsky, que obtuvo su doctorado en neuroendocrinología por la Universidad Rockefeller en 1984, es profesor de ciencias biológicas y neurología en Stanford e investigador asociado de los Museos Nacionales de Kenya. Investiga la muerte neuronal, la terapia génica y la fisiología de primates.





FRANS LANTING *Minden Pictures* (*izquierda*); THEO ALLOFS *Corbis* (*centro*); W. PERRY CONWAY *Corbis* (*derecha*)

3. LOS CARACTERES SEXUALES SECUNDARIOS distinguen al macho adulto (*izquierda*) del macho adolescente de desarrollo interrumpido (*centro*) y de la hembra adulta (*derecha*). Quizá los más llamativos sean las amplias almohadillas de las mejillas del macho adulto, o "rebordes", y el saco gular muy desarrollado con el que emiten fuertes gritos, las "llamadas largas". El peso medio de los machos adultos dobla con creces el de los machos de desarrollo interrumpido y las hembras adultas.

narios de 13 zoológicos, obtuvimos más de 1000 muestras de orina de 28 orangutanes macho, junto con información sobre su nivel de desarrollo (juvenil, adolescente interrumpido, adolescente en desarrollo o adulto), alojamiento, dieta, historial clínico y crecimiento. En colaboración con Nancy Czekala, del Centro para la Reproducción de Especies en Peligro, del Zoo de San Diego, medimos los niveles de nueve hormonas y comparamos animales en diferentes estadios de desarrollo.

En primer lugar nos centramos en la hormona del crecimiento, que es crucial para la maduración normal. En los juveniles, los adolescentes con el desarrollo interrumpido y los adultos, los niveles de hormona del crecimiento en orina eran bajos y muy similares, con variaciones del orden del 15 por ciento sólo. Los machos adolescentes que maduraban tenían, en cambio, niveles hormonales unas tres veces más elevados. Este resultado servía como control interno; demostraba que la estimación externa del estadio de desarrollo de un animal se ajustaba bien al perfil hormonal relacionado con el crecimiento. En otras palabras, los machos adolescentes que maduraban a ojos vista (crecían, se les agrandaban los rebordes de las mejillas, etc.) experimentaban asimismo cambios hormonales.

Después tomamos en cuenta las hormonas que responden al estrés. La más conocida es la adrenalina (llamada asimismo epinefrina); desempeña un papel fundamental en la movilización de energía. Por desgracia, no se la puede medir con precisión en la orina. Pero sí podíamos determinar los niveles de otra clase de hormonas clave del estrés, los glucocorticoides, supresores del crecimiento, la reparación de tejidos y la reproducción. Además, medimos los niveles de prolactina, una hormona indicadora de estrés que inhibe la reproducción.

Aquí es donde nos llevamos una sorpresa. Los niveles de glucocorticoides no diferían entre los juveniles, los adolescentes de desarrollo interrumpido y los adultos. Tampoco los niveles de prolactina. Pero los niveles de glucocorticoides y de prolactina de los adolescentes que se encontraban en plena maduración doblaban, más o menos, los de los demás grupos. No eran los adolescentes con desarrollo interrumpido los que parecían hallarse estresados, sino los que maduraban.

Otra sorpresa llegó cuando examinamos las hormonas reproductoras. Como era de esperar, los perfiles hormonales de los machos adolescentes que desarrollaban caracteres sexuales secundarios indicaban un sistema gonadal activo. Los machos en desarrollo poseían niveles de testosterona y de hormona luteinizante (que estimula la liberación de testosterona) más elevados que los adolescentes con el desarrollo interrumpido. En éstos eran como los de los adultos; tampoco sus niveles de la hormona estimuladora del folículo (FSH), que promueve la maduración de los espermatozoides en los machos, diferían de los hallados en los adolescentes en desarrollo o los machos adultos; otros investigadores han encontrado además que su esperma es funcional y maduro y que sus testículos tienen el mismo tamaño que los de los adolescentes en desarrollo.

Estrategias evolutivas

Estos descubrimientos trastornaron algunas viejas hipótesis acerca de los orangutanes. No parecía que los adolescentes de desarrollo interrumpido estuviesen estresados o reprimidos desde el punto de vista reproductor. El quid está en que un orangután macho puede mejorar sus probabilidades de reproducirse de más de una manera.

Una piedra angular de la moderna teoría de la evolución es que el comportamiento animal no ha evolucionado por el bien de la especie o del grupo social, sino para maximizar el número de copias de genes que un individuo y sus parientes cercanos transmiten. Durante mucho tiempo dominaron el estudio de los primates modelos simplistas de cómo los animales consiguen este objetivo: el comportamiento del macho, decían, apenas si consiste en otra cosa que en agresiones y competencia para ganarse el acceso a las hembras. Si sólo hay una hembra sexualmente receptiva en un grupo con muchos machos, la competencia hará que el macho que más arriba esté en la jerarquía sea el que se aparee con la hembra; si hay dos hembras receptivas, los machos situados en el primer y segundo lugar de la jerarquía se aparearán con ellas, y así sucesivamente.



CHARLES Y JOSETTE LENARS *Corbis*

Pero en los primates sociales este tipo de comportamiento se ve rara vez. Los primates macho eligen diferentes estrategias para maximizar su éxito reproductor. ¿Por qué hay diferentes opciones? Porque la estrategia que más lógica parece (desarrollar músculos potentes y caracteres sexuales secundarios espectaculares para ganar en la competencia entre macho y macho) tiene algunos inconvenientes graves. En muchas especies, mantener estos caracteres secundarios requiere elevados niveles de testosterona que perjudi-



4. LOS ORANGUTANES se cuentan entre los más solitarios entre los grandes primates, pero de vez en cuando se desplazan y comen en pequeñas tropillas. Tres orangutanes se acicalan mutuamente en una selva de Borneo (*izquierda*). Una hembra adulta descansa con su hijo en el Parque Nacional Tanjung Puting, de Borneo también (*arriba*).



can la salud, a la que tampoco beneficia la agresividad ligada a esta estrategia.

Por otra parte, un mayor tamaño corporal impone mayores demandas metabólicas y una mayor necesidad de proveerse de alimentos. Durante las hambrunas, los primates más corpulentos tienen menos probabilidades de sobrevivir. El cuerpo más pesado del macho maduro limita asimismo el número de árboles y ramas en los que puede buscar alimento. Y el desarrollo de caracteres sexuales secundarios hace que un macho llame más la atención, tanto de los depredadores como de los demás machos, que consideran estas características un desafío.

Es probable que la competencia entre los machos adultos y los adolescentes en desarrollo sea la explicación de que éstos padezcan niveles elevados de hormonas de estrés. Para un orangután macho adulto, otro que está madurando será pronto un competidor, así que lo convierte en objeto primario de su agresividad. El mismo patrón se ve en los caballos y otros ungulados sociales; sólo cuando los jóvenes machos empiezan a desarrollar caracteres sexuales secundarios se ponen los dominantes no emparentados con ellos a hostigarlos para que abandonen el grupo. Otro ejemplo procede de las investigaciones de uno de nosotros (Sapolsky) sobre los papiones salvajes. Algunos papiones macho socialmente subordinados tienen niveles de glucocorticoides mucho más elevados que los de los animales dominantes; la razón fundamental es que estos subordinados retan activamente a los machos situados en un rango jerárquico superior.

En cambio, un macho con desarrollo interrumpido no le dará a un adulto la impresión de que lo amenaza o desafía; su aspecto es sólo el de un juvenil. En la medida en que los orangutanes macho de desarrollo interrumpido pasan inadvertidos, parece que se libran del estrés social. Más aún, su discreción quizá les confiera una ventaja competitiva en lo que se refiere a la reproducción. En muchas especies de primates, los machos situados en los niveles inferiores de la jerarquía realizan una parte considerable de las cópulas. Las pruebas genéticas de paternidad efectuadas a estos primates han demostrado que los machos subordinados no salen malparados a la hora de transmitir sus genes. Este hallazgo se extiende a los orangutanes: estudios en poblaciones de zoológicos demostraron que los machos de desarrollo interrumpido se aparean y son fértiles; después, Sri Suci Utami, de la Universidad de Utrecht, Holanda, halló que eran, en Sumatra, los padres de alrededor de la mitad de las crías.

¿Por qué razón estos machos situados en la parte baja de la jerarquía participan en tantos apareamientos? En algunas especies de primates, como el papión común o amarillo, las hembras pueden decidir con quién se aparean. Con frecuencia eligen machos que, en vez de enzarzarse con otros, exhiben una fuerte filiación macho-hembra y conducta parental. Incluso cuando los papiones macho dominantes montan guardia para evitar que los de categoría inferior se apareen, las hembras suelen iniciar apareamientos furtivos (que a veces se han calificado de "cópulas robadas") con los subordinados. Para los papiones macho de jerarquía inferior, la estrategia de entablar "amistades" asociativas con las hembras es viable porque evita los costes metabólicos, las heridas y el estrés de la competencia entre machos.

Pero los orangutanes macho con desarrollo interrumpido no se implican en relaciones asociativas a largo plazo con las hembras, aunque a veces acompañan a una durante varios días en su vagabundeo por el bosque. Además, la gran mayoría de los orangutanes hembra adultos son sexualmente receptivos sólo con los machos maduros. ¿Cómo se aparean los machos de desarrollo interrumpido? La observación de los orangutanes tanto en la naturaleza como en poblaciones cautivas ha enseñado que obligan a las hembras a copular con ellos. Violación es un término adecuado: las hembras adultas se resisten enérgicamente a esos adolescentes, y los muerden siempre que pueden al tiempo que emiten unos fuertes sonidos guturales (los "gruñidos de violación") que sólo se oyen en tales circuns-

tancias. Los machos adultos a veces también violan, pero ni mucho menos con tanta frecuencia como los de desarrollo interrumpido. En un estudio realizado en Borneo durante los primeros años de la década de 1980, Mitani y sus ayudantes de campo observaron 151 cópulas de machos de desarrollo interrumpido; en 144 forzaron a la hembra.

Así, parece que en los machos de orangután adolescentes la evolución ha engendrado dos estrategias reproductoras. Si no hay machos completamente maduros en las inmediaciones, lo más probable es que el adolescente se desarrolle con rapidez, con la esperanza de atraer la atención de las hembras. Pero cuando los hay, el desarrollo interrumpido tiene sus ventajas. Si el ambiente social cambia, si los machos adultos de las inmediaciones mueren o migran, pongamos por caso, los de desarrollo interrumpido desarrollarán deprisa rasgos sexuales secundarios y cambiarán sus pautas de comportamiento. En la actualidad, se intenta determinar de manera exacta cómo la presencia o ausencia de machos adultos dispara los cambios hormonales de los adolescentes.

Descubrimientos desagradables

¿Qué nos enseña el orangután macho? En primer lugar, que una situación que parece estresante desde una perspectiva humana no tiene por qué serlo para otros animales. En segundo, que la existencia de estrategias reproductoras alternativas muestra que el planteamiento óptimo varía radicalmente en diferentes circunstancias sociales y ecológicas. No hay un único modelo para comprender la evolución del comportamiento. En tercer lugar, si bien las estrategias alternativas fundadas en la elección por parte de la hembra han encontrado una audiencia receptiva entre los científicos, la de los orangutanes macho de desarrollo interrumpido, la violación, no resulta grata. Pero el estudio de los primates ha demostrado una y otra vez que su comportamiento dista de ser de película de dibujos animados. Piénsese en el infanticidio estratégico de los langures o en los ataques organizados, a veces llamados genocidios, entre grupos de chimpancés macho.

Hemos de ser prudentes si queremos que el estudio de los animales nos enseñe acerca del comportamiento humano. Tienta sacar, sin pensárselo dos veces, una conclusión errada: puesto que entre los orangutanes hay cópulas forzadas y en los seres humanos ocurre algo similar, la violación tiene una base natural y, por lo tanto, es inevitable. Este razonamiento ignora que el orangután es el único primate no humano que se dedica a forzar cópulas como medio ordinario para tener descendencia. Además, la observación detenida de la violación entre los orangutanes muestra que es muy distinta de la violación humana; nunca, por ejemplo, se ha visto que un orangután macho hiera a una hembra durante la cópula de manera intencionada. Y lo que es más importante, la fisiología, el ciclo biológico y la estructura social del orangután son completamente distintos de los de cualquier otro primate. Los orangutanes han desarrollado un conjunto único de adaptaciones para sobrevivir en su ambiente. Sería el colmo de lo absurdo sacar paralelismos simplistas entre su conducta y la de los seres humanos.

Bibliografía complementaria

REFLECTIONS OF EDEN: MY YEARS WITH THE ORANGUTANS OF BORNEO. Biruté M. F. Galdikas. Back Bay Books, 1996.

REPRODUCTIVE HORMONE PROFILES IN CAPTIVE MALE ORANGUTANS: IMPLICATIONS FOR UNDERSTANDING DEVELOPMENTAL ARREST. Anne N. Maggioncalda, Robert M. Sapolsky y Nancy M. Czekala, *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 109, n.º 1, págs. 19-32; mayo 1999.

ORANGUTANS: WIZARDS OF THE FOREST. Anne E. Russon. Firefly Books, 2000.

MALE ORANGUTAN SUBADULTHOOD: A NEW TWIST ON THE RELATIONSHIP BETWEEN CHRONIC STRESS AND DEVELOPMENTAL ARREST. Anne N. Maggioncalda, Nancy M. Czekala y Robert M. Sapolsky, *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 118, n.º 1, págs. 25-32; mayo 2002.



Vacunas contra el sida

¿Dispondremos pronto de alguna que sea eficaz contra el virus?

Carol Ezzell

1. BOTELLINES de una vacuna potencial contra el sida en espera para su ensayo en humanos.

HANK MORGAN *TimePix*

Nadie se imaginaba que las cosas iban a ser tan difíciles. Cuando el VIH, virus responsable del sida, se identificó en 1984, Margaret M. Heckler se hallaba al frente del Departamento de Salud y Asistencia Social de los Estados Unidos. En su ingenuidad, predijo que habría una vacuna en el plazo de dos años.

Han pasado veinte años desde que irrumpió la pandemia. Suman ya, repartidos por todo el planeta, 40 millones los afectados. A tres millones de fallecidos se elevó el recuento del año pasado. Si bien se dispone ya de varias vacunas potenciales contra el sida en diferentes etapas de ensayo clínico, por el momento ninguna parece responder a la promesa primera. Una y otra vez, los investigadores han venido cosechando resultados que se creían esperanzadores, para terminar dándose de bruces con el muro infranqueable de la realidad. Dos años atrás, era todavía frecuente oírles confesar en privado que ellos no verían el día en que se lograra una vacuna, siquiera aportase una protección parcial.

Cierto es que en los meses transcurridos no se ha conseguido un avance decisivo. Pero han aparecido algunos datos que permiten mantener viva la esperanza de que pronto se abra un camino a los empeñados en hallar la vacuna contra el sida. Nos hallamos ante un momento interesante para la investigación, si nos hacemos eco de la declaración de Gregg Gonsalves, director de Tratamiento y Prevención de la Sociedad Crisis de Salud de los Homosexuales de la Ciudad de Nueva York. En su lenguaje metafórico, extraído del mundo teatral, nos encontraríamos en el segundo acto.

Los dramaturgos presentan, en el primer acto, los personajes y el cuadro espacio-temporal. Dedican el segundo a profundizar en el núcleo de la situación teatralizada. En el primer acto de la investigación sobre la vacuna contra el sida debutó el VIH, uno de los primeros retrovirus causantes de una enfermedad en humanos. A diferencia de lo que ocurre con otros virus, los retrovirus introducen su material genético en el de las células del organismo que invaden; los genes víricos constituyen, desde entonces, parte permanente de las células infectadas y de la descendencia de las mismas. Los retrovirus se reproducen con celeridad y astucia asombrosas, algo que les confiere una capacidad singular para experimentar mutaciones que permiten al VIH cambiar de identidad, burlando los fármacos antirretrovíricos y al sistema inmunitario.

El primer acto reveló también la respuesta inmunitaria del organismo ante el VIH. Integran dicha respuesta anticuerpos (moléculas con forma de Y que se unen a los invasores, aquí víricos, y los marcan para su ulterior destrucción) y células *T* citotóxicas, o asesinas (leucocitos encargados de la destrucción de células infectadas de virus).

Tras la infección, el sistema inmunitario libra una lucha tenaz, durante años, contra el VIH. Produce millones de nuevas células *T* citotóxicas contra los miles de millones de partículas víricas que se generan cada día en las células infectadas. Además, el sistema inmunitario despliega ejércitos de anticuerpos dirigidos contra el VIH, al menos en los primeros momentos de la infección. Los anticuerpos, sin embargo, demuestran ser bastante ineficaces contra el enemigo.

Se levanta el telón para el segundo acto. El VIH sigue en escena. Para finales del año en curso, deberían estar disponibles los resultados del primer ensayo a gran escala de una vacuna contra el sida. Pero son muy pocos los expertos que se sienten optimistas; de un primer análisis somero se desprende la escasa eficacia de la prueba en cuestión. Añádase a ello la controversia que rodea a otro ensayo gigantesco apoyada por el gobierno de los Estados Unidos; en él se someterá a prueba una vacuna potencial a principios de septiembre. Se llevará a cabo en Tailandia.

Planean en vuelo otros enfoques que mantienen atenta a la comunidad científica. Las estrategias seguidas reabren el debate sobre si una va-

cuna, para que sea útil, debe instar respuestas inmunitarias que eviten por completo que el VIH colonice las células de una persona o si una vacuna pudiera reputarse aceptable aun cuando no lograra ese objetivo en toda su plenitud. Algunos le reconocen un valor potencial a las vacunas que despiertan los tipos de respuesta inmunitaria que operan en los inicios de la instauración celular del virus. Al restringir la replicación vírica de una manera más eficaz que las respuestas naturales del organismo, tales vacunas, aducen, podrían al menos contribuir a prolongar la vida de las personas infectadas y retrasar la aparición de la fase sintomática del sida.

A principios del decenio de los noventa, creíase que la mejor estrategia para fabricar una vacuna contra el sida habría de partir del estudio de los individuos que albergaron el VIH durante un decenio, por lo menos, sin haber caído enfermos de sida. Por desgracia, muchas de estas personas también sucumbieron a sus estragos al cabo de un tiempo. John P. Moore, de la Universidad de Cornell, atribuye esa longevidad relativa a la conjunción de un virus debilitado y a un sistema inmunitario potente. En otras palabras, se habrían encontrado con una forma de VIH de crecimiento lento en un momento en que su organismo disponía de la munición suficiente para mantener las cosas bajo control.

¿Sin rastro en la naturaleza?

Durante años se han venido buscando los correlatos de la inmunidad para el VIH, vale decir, la combinación de respuestas inmunitarias que, una vez inducidas por una vacuna, protegerían al individuo contra la infección. Max Essex, de la Universidad de Harvard, admite que tal empeño carece de fundamento en la naturaleza. Por eso mismo, la búsqueda de una vacuna contra el sida debe avanzar a ciegas.

Para que sea útil una vacuna contra el sida tiene que superar con éxito tres etapas de ensayo en humanos. En la fase I, se administra la vacuna a decenas de personas con el fin de valorar su seguridad y establecer la dosis apropiada. En la fase II del ensayo la muestra abarca ya centenares de personas; presta especial atención a la inmunogenicidad, su capacidad para desencadenar una respuesta inmunitaria. En la fase III, la vacuna potencial se aplica a millares de voluntarios que se someten a observación durante un largo período para comprobar si les protege de la infección. Las pruebas de la fase III para cualquier fármaco suelen ser muy costosas y difíciles de administrar; en el caso del sida, los ensayos presentan un reto especial por la exigencia de una condición paradójica: a los sujetos que reciben la vacuna se les insiste en que deben reducir las posibilidades de infección con el uso de preservativos o, si son drogadictos, de agujas esterilizadas, porque el VIH se transmite por contacto sexual o por vía sanguínea. Pero el estudio aportará resultados de interés sólo si algunas personas no siguieron el consejo y se expusieron a la enfermedad.

La primera vacuna potencial que ha llegado a la fase III contiene una proteína, la gp120, que emerge de la envoltura externa del VIH. De ella se vale el virus para asirse a las células e infectarlas. Por lo menos en teoría, la presencia de gp120 en la circulación debería activar el sistema inmunitario del receptor, provocando un ataque inmediato contra la gp120 en cuanto el virus VIH penetre en el organismo.

Esta vacuna, fabricada por VaxGen, división de Genentech, se halla en fase de pruebas. La muestra incluye más de 5400 personas (en su mayoría varones homosexuales) de Estados Unidos y Europa y unos 2500 drogadictos del sudeste asiático. Para finales del año en curso se espera conocer los resultados de esta prueba europea/estadounidense, que comenzó en 1998.

Muchos estudiosos del sida no esconden su escepticismo ante el enfoque de VaxGen. Por razones de peso. De suyo, la gp120 se presenta en agrupaciones de tres sobre la superficie del virus, en tanto que la vacuna en cuestión emplea la forma monomérica de la molécula. Además, las vacunas constituidas exclusivamente por proteína promueven la acción de sólo un anticuerpo, una respuesta humoral, sin que se estimule el brazo celular del sistema inmunitario, la rama de este sistema que comprende la actividad de las células *T* citotóxicas. Abunda la sospecha de que no basta la respuesta exclusiva de los anticuerpos; para prevenir el sida, debe contarse con una respuesta celular.

Los primeros resultados obtenidos no parecen reforzar la esperanza. El pasado octubre, un panel independiente de control del seguimiento ofreció un análisis preliminar de los resultados del programa europeo/estadounidense. Aunque el panel puso el énfasis en la seguridad de que los voluntarios no registraran efectos secundarios peligrosos asociados a la vacuna, se hallaba facultado también para recomendar que se abreviara el ensayo si parecía que la vacuna funcionaba. No ha habido tal recomendación.

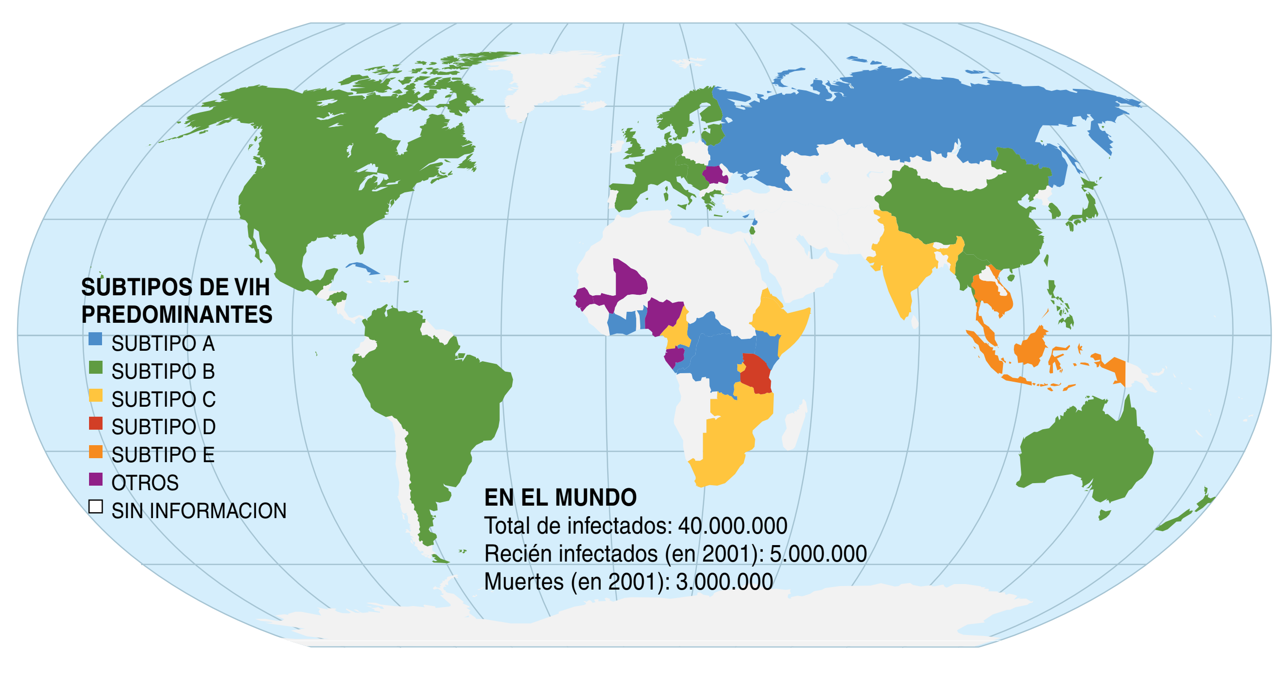
Por su parte, VaxGen afirma que solicitará la aprobación de la administración de los Estados Unidos para vender la vacuna aun cuando las pruebas de la fase III demostraran una eficacia de sólo el 30 %. Donald P. Francis, presidente de la compañía y su cofundador, recuerda

Resumen/*Vacunas contra el sida*

- Los resultados finales del primer ensayo en gran escala de una vacuna contra el sida llegarán antes de terminar el año en curso. Existe, sin embargo, bastante reticencia en torno a la eficacia de la misma.
- La investigación centra sus mayores esfuerzos en la creación de vacunas potenciales contra el sida que estimulen ambos brazos del sistema inmunitario: las células asesinas y los anticuerpos.
- Existen cinco subtipos principales, o clados, de VIH. Se debate la necesidad de idear vacunas exclusivas de un subtipo para el área donde éste predomina.

EL SIDA EN EL MUNDO

De los cuarenta millones de personas que padecen el sida, la mayoría viven en el Africa subsahariana y en el sur y sudeste asiático, según los datos correspondientes al año 2001 suministrados por el programa conjunto de Naciones Unidas sobre VIH/sida. Hay cinco cepas principales de VIH, que también se llaman subtipos o clados. Aunque en una zona determinada puede darse más de un subtipo, el mapa destaca el clado predominante en la región. Las fronteras entre los subtipos predominantes no son exactas, pues cambian con frecuencia.



1 AFRICA SUBSAHARIANA
Total de infectados: 28.100.000
Recién infectados: 3.400.000
Muertes: 2.300.000

2 SUR-SUDESTE ASIATICO
Total de infectados: 6.100.000
Recién infectados: 800.000
Muertes: 400.000

3 IBEROAMERICA
Total de infectados: 1.400.000
Recién infectados: 130.000
Muertes: 80.000

4 ASIA ORIENTAL/ISLAS DEL PACIFICO
Total de infectados: 1.000.000
Recién infectados: 270.000
Muertes: 35.000

5 EUROPA ORIENTAL/ASIA CENTRAL
Total de infectados: 1.000.000
Recién infectados: 250.000
Muertes: 23.000

6 NORTEAMERICA
Total de infectados: 940.000
Recién infectados: 45.000
Muertes: 20.000

7 EUROPA OCCIDENTAL
Total de infectados: 560.000
Recién infectados: 30.000
Muertes: 6800

8 AFRICA DEL NORTE/ ORIENTE MEDIO
Total de infectados: 440.000
Recién infectados: 80.000
Muertes: 30.000

9 CARIBE
Total de infectados: 420.000
Recién infectados: 60.000
Muertes: 30.000

10 AUSTRALIA/NUEVA ZELANDA
Total de infectados: 15.000
Recién infectados: 500
Muertes: 120

LAURIE GRACE; FUENTES: UNAIDS (*datos*) Y VADIM ZALUNIN *Laboratorio Nacional de Los Alamos (fronteras entre clados)*

que la eficacia de la primera vacuna contra la poliomielitis, desarrollada por Jonas Salk en 1954, no superaba el 60 %, pese a lo cual acabó con la incidencia de la enfermedad en Estados Unidos drástica y rápidamente.

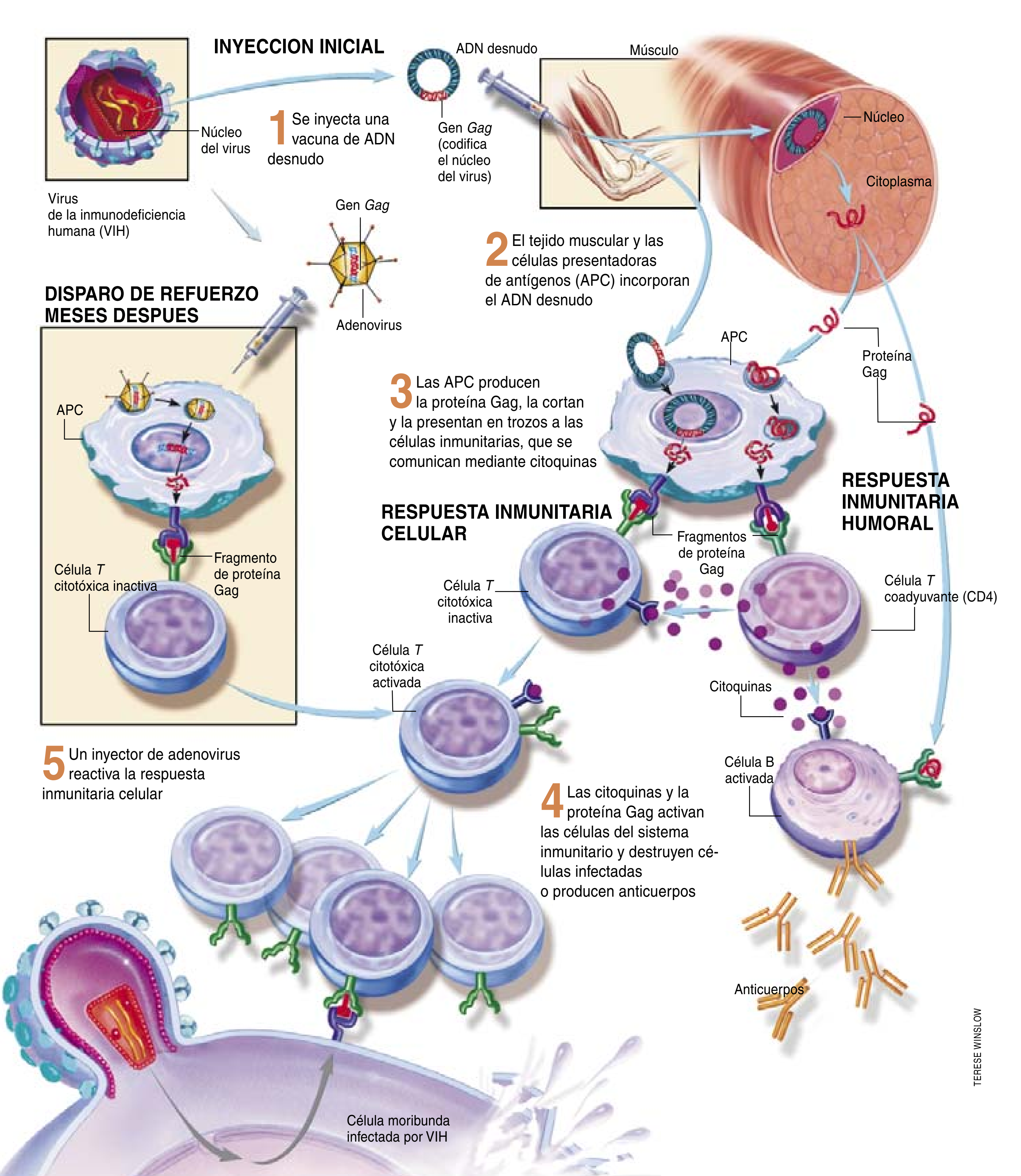
Pero la estrategia podría resultar contraproducente, si las personas que reciben una vacuna de eficacia parcial contra el sida supusieran que se hallan protegidas contra la infección y se entregaran a conductas de riesgo. Karen M. Kuntz y Elizabeth Bogard, de la Universidad de Harvard, han pergeñado un modelo de ordenador que simula los efectos de esa posible vacuna en un grupo de drogadictos de Tailandia. De acuerdo con ese modelo, una vacuna de una eficacia del 30 % no frenaría la diseminación del sida en una comunidad si el 90 por ciento de las personas que la recibieron volvió a utilizar jeringuillas contaminadas. Pero este retorno a las conductas de riesgo no eliminaría el beneficio público si la vacuna alcanzara una cota mínima del 75 por ciento en punto a eficacia.

El estudio controvertido que ha de comenzar en Tailandia constituye otro ensayo de fase III a gran escala; participarán 16.000 personas. Combina la vacuna VaxGen con un virus del tipo de varicela, en el que se han insertado genes determinantes de la gp120 y de otras dos proteínas, una que interviene en la fabricación del núcleo del VIH y otra que permite la multiplicación del virus. Puesto que el virus genéticamente modificado (producido por Aventis Pasteur) entra en las células obligándolas a desplegar en su superficie fragmentos de VIH, estimula la rama celular del sistema inmunitario.

La política se ha interpuesto a menudo en las investigaciones y desarrollo de los ensayos de la

Vacunas contra el sida

En la estrategia seguida por los laboratorios Merck para la fabricación de vacunas se requiere una inyección inicial de una vacuna de ADN desnudo; a ésa, meses después, le sigue una inyección de un adenovirus genéticamente alterado. Con ambas se pretende desencadenar una respuesta inmunitaria dirigida contra la proteína del núcleo del VIH, Gag; en particular, activar el brazo celular del sistema inmunitario: el que usa las células *T* citotóxicas para destruir las células infectadas por los virus. La vacuna de ADN desnudo da lugar a la producción de moléculas de anticuerpo contra Gag, pero esos anticuerpos no son muy útiles para combatir el VIH.



vacuna gp120/virus de la varicela. Así, en un comienzo, el Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas y el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (NIAID) tenían previsto realizar un doble ensayo. Pero el NIAID renunció a ese propósito tras examinar los datos de un estudio de fase II que demostró que no llegaban al 30 por ciento los voluntarios que habían generado células *T* citotóxicas contra el VIH.

Protección parcial

En la escena aparecen los laboratorios Merck. Están completando pruebas de fase I de dos posibles vacunas, que son susceptibles de administrarse juntas. En febrero Emilio Emini, alto directivo de la empresa, informó a los asistentes a la Novena Conferencia sobre Retrovirus e Infecciones Oportunistas en Seattle sobre los primeros datos recogidos en ambos ensayos.

El primer ensayo investiga una vacuna potencial compuesta sólo por el gen *gag* del VIH, que codifica la proteína del núcleo del virus. Se administra en forma de vacuna de ADN desnudo; así se llama la que consta exclusivamente de ADN. Las células incorporan el gen y lo utilizan para marcar la proteína vírica, que a su vez estimula una respuesta humoral suave (y probablemente inútil) y una respuesta celular potente. De acuerdo con las cifras aportadas por Emini, el 42 por ciento de los voluntarios que habían recibido la dosis mayor de la vacuna de ADN desnudo elevaron el nivel de células *T* citotóxicas, apropiadas para atacar las células infectadas por VIH.

El segundo ensayo emplea el gen *gag* del VIH introducido en un adenovirus alterado. (Los adenovirus son los agentes responsables de muchos resfriados.) Este adenovirus alterado transporta el gen *gag* hasta las células, que, entonces, fabrican la proteína del núcleo del VIH y despiertan una respuesta inmunitaria contra dicho polipéptido. Entre el 44 y el 67 por ciento de las personas que habían recibido inyecciones de la vacuna fundada en el adenovirus generaron, informó Emini, una respuesta inmunitaria celular cuya intensidad variaba de acuerdo con la dosis administrada y el tiempo que había transcurrido desde su aplicación.

Los laboratorios Merck han comenzado a ensayar una combinación de los enfoques con el ADN y el adenovirus. Sostiene Emini que las vacunas actuarán mejor cuando se administren en el marco de un mismo régimen. En su opinión, no se trata de que la vacuna del ADN sea una buena vacuna por sí misma, sino de que puede actuar como un cebador del sistema inmunitario al que ha de seguir meses después una inoculación de vacuna con el adenovirus. Pudiera objetarse con razón que la mayoría de las personas han padecido resfriados por adenovirus; en cuyo caso, el sistema inmunitario de esos individuos poseería ya un arsenal dispuesto a barrer la vacuna de adenovirus antes de poder administrar su cargamento de genes VIH y estimular la inmunidad contra el sida. Pero quizás un aumento de la dosis de la vacuna de adenovirus superaría dicho obstáculo.

El grupo de Emini resalta la importancia de la inmunidad celular, cuya omisión podría explicar en parte los resultados desalentadores registrados hasta la fecha con vacunas diseñadas para generar respuestas humorales. Por repetir sus palabras: "Hay un buen grupo de anticuerpos razonablemente potentes aislados de personas infectadas con el VIH, pero no sabemos todavía cómo promover la aparición de esos anticuerpos con una vacuna". Opinión en la que abunda Lawrence Corey, del Centro Fred Hutchinson de Investigaciones Oncológicas de Seattle: "A uno le gustaría desencadenar ambas respuestas [celular y de anticuerpos], pero el progreso más claro se ha conseguido al despertar una respuesta celular".

Los anticuerpos constituyen la primera línea defensiva del sistema inmunitario. Se le supone un papel clave a la hora de evitar que los virus entren en contacto con las células que infectan. Aunque las vacunas diseñadas para poner en marcha la inmunidad celular (como las de Merck) no logren impedir la infección, sí permitirían un buen punto de partida para combatir el virus en el sujeto infectado. Con todo, las vacunas que se limitan a frenar la progresión de la enfermedad no detienen la pandemia; los sidosos podrían seguir diseminando la infección, pese a tener menos virus en la sangre.

No ha sido fácil hallar una vía para inducir la producción de anticuerpos capaces de neutralizar el VIH. Por varias razones. En primer lugar, la extraordinaria versatilidad del virus; con su rápido cambio de forma, siempre va un paso por delante de la respuesta inmunitaria. Distingue al VIH, frente a los otros virus humanos, su notable capacidad de mutación. Cuando se consigue un anticuerpo neutralizante, no se trata ya del VIH operativo, sino del que había en el organismo un mes atrás.

Las vacunas que incorporan una molécula lógica, el gp120 —la proteína que el virus utiliza para invadir las células inmunitarias, como ya se ha señalado—, han fracasado quizá porque los anticuerpos que producen se unen a la zona equivocada de la molécula. El gp120 protege el sitio de enlace preciso que utiliza para engancharse al CD4, lugar de anclaje en las células inmunitarias, hasta el último nanosegundo, en que se abre de repente como una navaja. Para obviar ese problema, Jack H. Nunberg y su equipo, de la Universidad de Montana, sugirieron, hace tres años, producir vacunas con moléculas de gp120 expuestas previamente a CD4 y, por tanto, abiertas ya. Al no poderse avanzar en esa línea, ha cundido el escepticismo en torno a la misma.

Otro obstáculo posible para conseguir una vacuna contra el sida que desencadene la síntesis de anticuerpos VIH reside en la variedad de los subtipos de VIH. También llamados clados, afectan a distintas zonas del mundo. Hay cinco clados o subtipos principales, del A al E. Si el subtipo B es la cepa predominante en los Estados Unidos y Europa, en la mayoría de los países del Africa subsahariana —la región más castigada del planeta— señorea el clado C. Los subtipos fundamentalmente responsables del sida en el sur y sudeste de Asia —la segunda zona



ANTONY NJUGUNA *Reuters/TimePix*

2. UNA VOLUNTARIA de Kenia recibe una inyección en el marco de un proyecto sobre la vacuna contra el sida en ese país.

con mayor incidencia de sida en el mundo— son B, C y E.

De acuerdo con diversas investigaciones, los anticuerpos que reconocen el virus del sida de un subtipo quizá no identifiquen virus de otros subtipos. De lo que se desprende que una vacuna sintetizada a partir de la cepa que se encuentra en los Estados Unidos podría no proteger a personas de Sudáfrica, por ejemplo. Pero no existe unanimidad en torno al significado de las diferencias de clado; se discrepa también sobre la exclusividad de lugar de los tests de cepas correspondientes al subtipo prevalente en la zona en cuestión. Essex prepara ensayos de fase I de una vacuna fundada en un subtipo C en Botswana para finales de este año; mientras no exista seguridad, alega, de que una vacuna diseñada contra un subtipo pueda tener una reacción cruzada con virus de otra, hay que abordar los ensayos de vacunas con el subtipo prevalente en las poblaciones estudiadas. La reactividad cruzada podría ocurrir en circunstancias ideales.

El uso del clado correspondiente evita que los países del Tercer Mundo se conviertan en conejillos de Indias para ensayar una vacuna destinada a los Estados Unidos y Europa. Las pruebas de VaxGen en Tailandia se basan en una combinación de los subtipos B y E; en abril la Iniciativa Internacional de Vacunas contra el Sida expandió sus pruebas del subtipo A en Kenia, donde se encuentra el subtipo de clase A.

Pero en enero Malegapuru William Makgoba y Nandipha Solomon, del Consejo de Investigaciones Médicas de Sudáfrica, junto con Timothy Johan Paul Tucker, de la Iniciativa Sudafricana de Vacunas contra el Sida, escribían en el *British Medical Journal* que la pertinencia de los subtipos de VIH estaba todavía por resolverse. Al haber los subtipos adquirido una importancia política, los gobiernos podrían entrometerse en el camino de los ensayos de alcance internacional sobre su eficacia.

Si nos guiamos por los resultados preliminares de los ensayos realizados con la vacuna Merck, habrá que aceptar que las diferencias de clado se difuminan cuando entra en acción la inmunidad celular. En la reunión sobre retrovirus de febrero, Emini señaló que las células citotóxicas, 10 de cada 13 personas que habían recibido una vacuna basada en el subtipo B, reaccionaban también en las pruebas de laboratorio ante proteínas víricas de los subtipos A o C. “Hay una respuesta potencial para tipos cruzados en la inmunidad celular”, fueron sus palabras. Aunque admitió que eso no va a ser así para los anticuerpos. Es probable que la variación de subtipos desempeñe un papel mucho menor para las células asesinas que para los anticuerpos, porque la mayoría de las células *T* citotóxicas reconocen zonas del VIH que comparten los distintos clados.

Así las cosas, Johnston, del NIAID, propone utilizar los cinco anticuerpos en cada vacuna. Línea en que trabajan ya los laboratorios farmacéuticos Chiron con su vacuna multiclado; acaban de comenzar los ensayos clínicos de la misma. Pudiera ocurrir, no obstante, que su eficacia fuera limitada: que se reconozca sólo un determinado clado, con omisión del resto.

Cualquiera que sea la salida de la cuestión sobre los subtipos, no se pierde la esperanza de diseñar una vacuna contra el sida que promueva la puesta en marcha de las células asesinas y de los anticuerpos. Una meta tan prometedora cuan difícil.

Bibliografía complementaria

HIV VACCINE EFFORTS INCH FORWARD. Brian Vastag en *Journal of the American Medical Association*, vol. 286, n.º 15, páginas 1826-1828; 17 de octubre de 2001.

El ciclo vital de las galaxias

Guinevere Kauffmann y Frank van den Bosch

LA GALAXIA DEL SOMBRERO es un ejemplo de casi todos los fenómenos que los astrónomos quieren explicar desde hace un siglo. Tiene un bulbo elipsoidal y brillante de estrellas, un agujero negro de enorme masa enterrado en el bulbo, un disco con brazos espirales (*que se observan casi de canto*) y cúmulos de estrellas dispersos por los alrededores. Hasta más allá de esta imagen se extiende, según se cree, un halo de materia oscura, invisible por naturaleza.

Se está a punto de correr el velo de misterio que envuelve un capítulo fundamental de la astrofísica: la diversidad de las galaxias

OBSERVATORIO MERIDIONAL EUROPEO/BARTHEL/NEESER

Hace un siglo, no se sabía que existiese una multitud de galaxias. Se creía que la nuestra era el universo. En el espacio había quizá mil millones de estrellas, y entre ellas unas manchas borrosas que parecían estrellas emergentes o tal vez moribundas. Hasta que llegó la época dorada de la astronomía, los primeros decenios del siglo XX; Edwin Hubble y otros demostraron entonces que muchas de esas manchas borrosas eran verdaderas galaxias.

¿Por qué las estrellas residen en aglomeraciones gigantescas entre las que median inmensos vacíos? ¿Por qué las galaxias adoptan esa sorprendente variedad de formas, tamaños y masas? No nos es posible observar el nacimiento de una galaxia en toda su extensión; procede con exasperante lentitud. Para montar las piezas hay que estudiar diferentes clases de galaxias, cada una observada en una fase distinta de su historia. Estas mediciones empezaron a ser cosa de todos los días hará menos de diez años, cuando la astronomía entró en una nueva edad de oro.

Gracias a los avances de los telescopios y los detectores podemos contemplar la evolución de las galaxias a lo largo de escalas de tiempo cósmicas. El telescopio espacial Hubble ha tomado imágenes muy profundas del cielo, captando galaxias de una debilidad aparente sin precedentes. Los instrumentos de tierra, como los grandes telescopios Keck, han proporcionado datos estadísticos de galaxias muy lejanas (y, por tanto, antiguas). Es como si los biólogos contaran con una máquina del tiempo que les permitiera viajar a la prehistoria y tomar fotografías de los animales y las plantas que habitaron la Tierra en cada época. El desafío de los astrónomos es el de los biólogos: determinar cómo evolucionaron las especies de los tiempos pasados hasta convertirse en las formas actuales.

La tarea tiene realmente dimensiones astronómicas. Abarca escalas físicas separadas por muchos órdenes de magnitud, de la evolución cósmica del universo entero a la constitución de una simple estrella. Esta amplitud complica mucho la elaboración de modelos realistas del nacimiento de una galaxia, pero liga estados de cosas antes dispersos. Con el descubrimiento de miles de millones de galaxias, la astronomía estelar perdió importancia para la cosmología, y viceversa: las estrellas eran demasiado pequeñas para que contasen a gran escala, los debates sobre el origen del universo demasiado abstractos para los astrónomos estelares. Pero ahora sabemos que un cuadro coherente del universo debe incluir lo grande y lo pequeño.

Resumen/*La evolución galáctica*

- Uno de los campos más activos de la astrofísica contemporánea es el estudio de la adquisición de la forma de las galaxias. Los telescopios examinan las galaxias más primitivas y las simulaciones por computadora desarrollan los hechos con un detalle sin precedente.
- Quizá reciban pronto las galaxias lo que se consiguió para las estrellas a principios del siglo XX: una explicación unificada, basada en unos pocos procesos generales, que abarque una inmensa variedad de objetos astronómicos. Entre esos procesos se cuentan las inestabilidades gravitatorias, el enfriamiento radiativo, la relajación (que lleva a las galaxias a un equilibrio interno) y las interacciones intergalácticas.
- Sin embargo, aún quedan abiertos varios interrogantes. Pudiera despejarlos el profundo efecto que las estrellas, por insignificantes que parezcan comparadas con las grandes escalas galácticas, ejercen en la estructura de las galaxias.

Las especies galácticas

Para descubrir cómo se formaron las galaxias se buscan pautas y tendencias en sus propiedades. Según el sistema de clasificación desarrollado por Hubble, las galaxias se dividen en tres grandes grupos: elípticas, espirales e irregulares (*véase el recuadro* "Tipos de galaxias"). Las más pesadas son las elípticas, sistemas regulares, sin rasgos especiales, casi esféricos, que apenas contienen gas o polvo. En ellas las estrellas giran en torno al centro como las abejas revolotean alrededor de la colmena. La inmensa mayoría de sus estrellas son muy viejas.

Las galaxias espirales, así nuestra propia Vía Láctea, son estructuras organizadas muy planas —se las llama también galaxias de disco—, donde las estrellas y el gas se mueven en órbitas circulares o casi circulares alrededor del centro. Los brazos espirales, que recuerdan a la rueda de un molinete, son filamentos compuestos de gas, polvo y estrellas jóvenes y calientes. En el centro presentan un bulbo, una acumulación esferoidal de estrellas, como una galaxia elíptica en miniatura. Alrededor de un tercio de las galaxias espirales ofrecen, hacia su centro, una estructura rectangular. Se piensa que estas "barras" están creadas por inestabilidades del disco.

Se denomina irregulares a las galaxias que no encajan en ninguna de las dos categorías precedentes. Parece que algunas fueron elípticas o espirales antes de que un encuentro reciente con una vecina las distorsionase. Otras son sistemas aislados, amorfos; no exhiben signos de perturbaciones recientes.

Cada una de las tres clases abarca galaxias de una amplia gama de luminosidades. En promedio, sin embargo, las elípticas brillan más que las espirales, y es más probable que una galaxia débil sea irregular que lo sea una brillante. Con las galaxias más débiles, las enanas, se rompe el esquema de la clasificación. Heterogéneas por naturaleza, cualquier intento de asignarles categorías precisas ha suscitado controversia. A grandes rasgos, se agrupan en dos bloques: los sistemas ricos en gas, donde se generan estrellas, y los pobres en gas, donde no ocurre ese fenómeno.

Una pista interesante acerca del origen de la morfología galáctica nos la aporta la curiosa relación que se advierte entre el tipo y la densidad local de galaxias. La mayoría de las galaxias están dispersas por el espacio, lejos de la vecina más cercana; de las que se encuentran en estas circunstancias, sólo del 10 al 20

TIPOS DE GALAXIAS

Según la clasificación “diapasónica” que elaboró Edwin Hubble en los años veinte del siglo pasado, hay tres tipos básicos de galaxias: elípticas (*a la derecha, el mango del diapasón*), espirales (*las púas del diapasón*) e irregulares (*abajo, a la izquierda*). Las galaxias más pequeñas, o enanas, cuentan con su propia, e incierta, taxonomía.

Cada uno de estos grupos se divide en subclases, definidas por los detalles morfológicos de las galaxias. A medida que se baja por el diapasón, el disco galáctico adquiere prominencia creciente en las imágenes ópticas, a expensas del bulbo central. Los diferentes tipos de Hubble quizá representen distintas fases de desarrollo. Las galaxias empiezan siendo espirales sin bulbos, sufren una colisión durante la cual se tornan irregulares y terminan constituidas en elípticas o espirales con bulbo.

ELIPTICAS

M89
E0

M49
E4

M110
E5

M84
S0

IRREGULARES

M82
Irregular

TIPOS DE ENANAS

M32
Elíptica

VII Zw 403
Compacta azul

Pequeña nube
de Magallanes
Irregular

Leo I
Esferoidal

ESPIRALES BARRADAS

NGC 660
SBa

NGC 7479
SBb

M58
SBc

ESPIRALES NORMALES

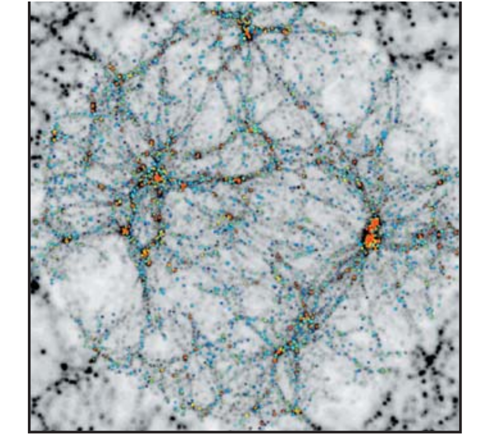
NGC 7217
Sa

NGC 4622
Sb

M51
Sc

N. A. SHARP/NOAO/AURA/NSF (*M82*); B. KEEL/TELESCOPIO HALL/OBSERVATORIO LOWELL (*M32*); R. SCHULTE-LADBECK/U. HOPP/M. CRONE/*ASTROPHYSICAL JOURNAL* (*enana compacta azul*); NOAO/AURA/NSF (*Pequeña Nube de Magallanes*); DAVID MALIN, © OBSERVATORIO ANGLO-AMERICANO (*Leo I*); NOAO/AURA/NSF (*M89, M49, M110, M84*); R. BRANCH/R. MILNER/A. BLOCK/NOAO/AURA/NSF (*NGC 660*); A. BLOCK/NOAO/AURA/NSF (*NGC 7479*); F. CIESLAK/A. BLOCK/NOAO/AURA/NSF (*M58*); B. KEEL/R. BUTA/G. PURCELL/ OBSERVATORIO INTER-AMERICANO DE CERRO TOLOLO, CHILE (*NGC 7217*); G. BYRD/R. BUTA/T. FREEMAN/NASA (*NGC 4622*); NASA/STSCI/AURA (*M51*)

por ciento son elípticas (las espirales dominan). El resto, sin embargo, se agrupa en cúmulos; para ellas, la situación se invierte. Las elípticas son mayoría, y las espirales que quedan apenas si cuentan con gas y estrellas jóvenes. Esta relación entre la densidad y la morfología intrigó durante largo tiempo a los astrónomos.



Las simulaciones ejecutadas con superordenadores de la distribución espacial de las galaxias concuerdan perfectamente con las observaciones.

H. MATHIS, V. SPRINGEL, G. KAUFFMANN Y S.D.M. WHITE *Instituto de Astrofísica Max Planck, Garching, Alemania,* Y G. LEMSON, A. ELDAR Y A. DEKEL *Universidad Hebrea, Israel (simulación de la formación de galaxias en una región de 900 millones de años-luz de diámetro)*

Luz y oscuridad

Un porcentaje pequeño de espirales y elípticas presentan la peculiaridad de poseer un centro muy pequeño y luminoso, un núcleo galáctico activo (NGA). Los ejemplos más extremos y raros son los cuásares, que brillan más que las galaxias a que pertenecen. Se piensa que los NGA contienen agujeros negros cuya masa multiplica millones y hasta miles de millones de veces la del Sol. La teoría predice que el gas que cae hacia estos monstruos radia un 10 por ciento de su energía intrínseca, suficiente para crear un haz luminoso que se detecte en el otro extremo del universo.

A los NGA se los consideraba antes anomalías, pero últimamente se ha visto que son una parte esencial en la formación de las galaxias. Alcanzaron su máxima actividad cuando el universo tenía alrededor de un cuarto de su edad actual —al mismo tiempo que se estaba creando la mayoría de las estrellas de las galaxias elípticas—. Es más, se cree que en el interior de toda galaxia elíptica y de toda galaxia espiral con bulbo residen agujeros negros supermasivos, haya o no un NGA central. De ello se infiere que toda galaxia ha pasado por uno o más episodios de NGA. Mientras la materia cae hacia el agujero negro, el núcleo está activo. Si no hay materia que lo alimente, permanecerá dormido.

La mayor parte de la información que poseemos acerca de estos fenómenos nos llega por mediación de los fotones: fotones ópticos de las estrellas, fotones de radio del gas de hidrógeno neutro, fotones de rayos X del gas ionizado. Pero puede que la gran mayoría de la materia no emita fotones de ninguna longitud de onda. Nos referimos a la famosa materia oscura, cuya existencia se conoce a partir de sus efectos gravitatorios. Las partes visibles de la galaxia se hallan envueltas en "halos" esféricos o elipsoidales de materia oscura. Se cree que, a escalas mayores, halos semejantes a ésos mantienen ligados los cúmulos de galaxias.

Hasta ahora, por desgracia, no se ha detectado la materia oscura directamente. Su naturaleza es todavía uno de los mayores misterios de la ciencia. Hoy día, los más aceptan que se trata de materia oscura fría (MOF), partículas sin identificar que apenas interaccionan entre sí o con las partículas comunes.

Se llevan veinte arduos años elaborando un modelo de la formación galáctica basado en la MOF. El marco básico es la teoría de la Gran Explosión y la expansión del universo. Los cosmólogos siguen debatiendo acerca del origen de la expansión y de lo sucedido en sus primeras fases, pero estas incertidumbres no afectan a la formación de las galaxias: su historia comienza unos cien mil años después de la Gran Explosión, cuando el universo se componía ya de bariones (esto es, materia ordinaria, sobre todo núcleos de hidrógeno y helio), electrones (ligados a los núcleos), neutrinos, fotones y MOF. Las observaciones indican que la materia y la radiación se distribuían homogéneamente: la densidad apenas variaba en una parte entre cien mil de un lugar a otro. El problema está en saber cómo pudieron ingredientes tan simples dar lugar a semejante variedad de galaxias.

Si se comparan las condiciones de entonces con la actual distribución de la materia, destacan dos diferencias importantes. La primera, que el universo abarca hoy una gama enorme de densidades. Las regiones centrales de las galaxias son más de cien mil millones de veces más densas que el universo en su promedio y la Tierra un trillón de veces más densa que ellas. La segunda, que los bariones y la MOF estaban mezclados al principio, mientras que hoy los bariones constituyen densos nudos (las galaxias) dentro de halos gigantescos de materia oscura. Los bariones y la MOF se han desacoplado.

La primera de estas diferencias halla explicación en la acción de la inestabilidad gravitatoria. A poco que una región sea más densa que la media, su exceso de masa ejercerá una fuerza gravitatoria superior a la media también y atraerá materia hacia sí. Se irán creando de esa forma campos gravitatorios mayores, que atraerán más y más materia. Este proceso amplifica las diferencias de densidad iniciales.

Relajación y equilibrio

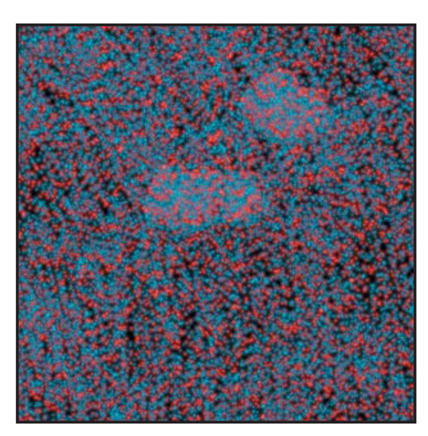
Mientras tanto, la gravedad de una región debe competir con la expansión del universo, que va separando la materia. Al principio la expansión cósmica domina y la densidad de la región disminuye. Por una razón: decrece más despacio que la densidad de sus

Los autores

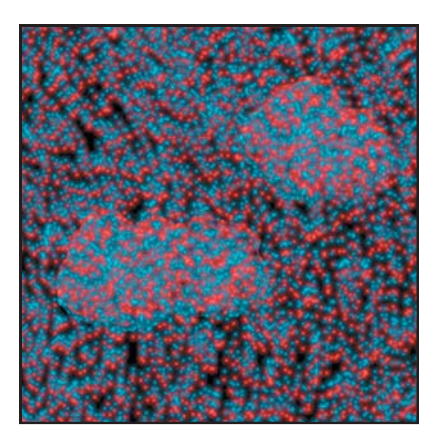
GUINEVERE KAUFFMANN Y FRANK VAN DEN BOSCH pertenecen a Instituto Max Planck de Astrofísica, en Garching, Alemania. Son expertos en la creación de modelos de la formación de las galaxias. Kauffmann ha emprendido hace poco el estudio de los datos del "Estudio Digital Sloan del Cielo"; cree que encierran las respuestas de algunos de los misterios de que se habla en este artículo. Van den Bosch está particularmente interesado en la formación de los discos de las galaxias y de los agujeros negros de gran masa de los centros galácticos.

LA GESTACION DE UNA GALAXIA

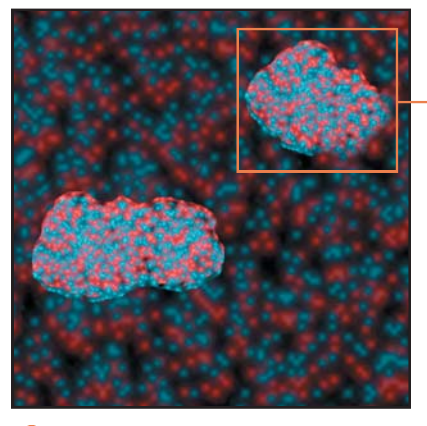
Tres procesos básicos determinaron la conversión de los grumos de la sopa primordial en galaxias: la expansión global del universo tras la Gran Explosión, la fuerza de la gravedad y el movimiento de las partículas y de otros constituyentes mayores. Las transacciones cambiantes entre estos tres fenómenos explican que las galaxias sean cuerpos coherentes, independientes, en vez de masas uniformes de gas o un enjambre de agujeros negros. Conforme a esta teoría, se coagulan primero cuerpos pequeños, que luego se juntan y construyen otros mayores. Un ingrediente crucial es la materia oscura, que alcanza un estado de equilibrio distinto del que caracteriza a la materia común.



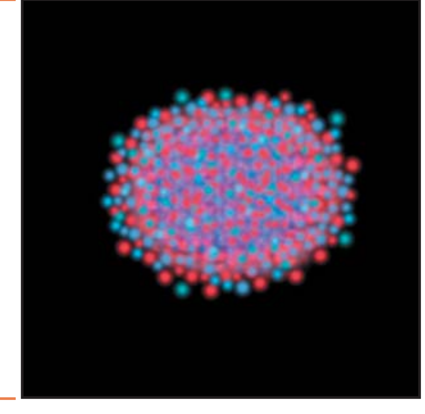
1 Muy al principio, un fluido primordial —mezcla de materia común (*azul*) y oscura (*rojo*)— llena el universo. Su densidad varía muy poco de un lugar a otro.



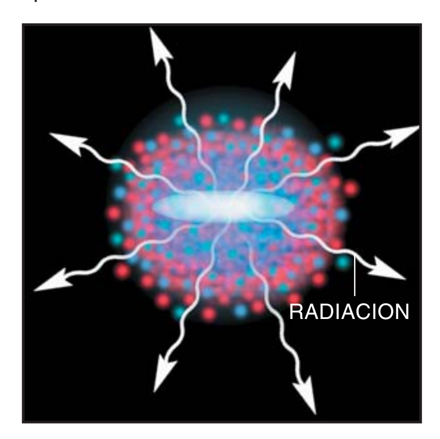
2 En una primera fase la expansión cósmica domina la gravedad. El fluido se diluye. Pero las zonas de mayor densidad se diluyen más despacio que las demás.



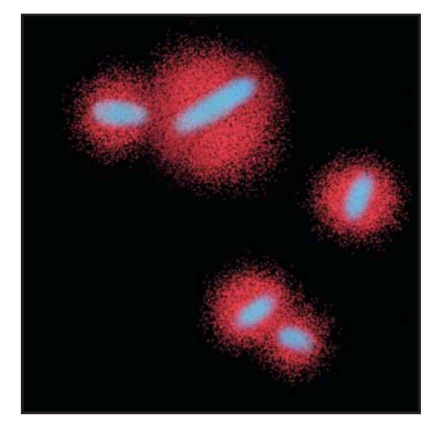
3 Con el tiempo, estas zonas se hacen tan densas, en comparación con su entorno, que la gravedad supera a la expansión; empiezan entonces a desplomarse sobre sí mismas.



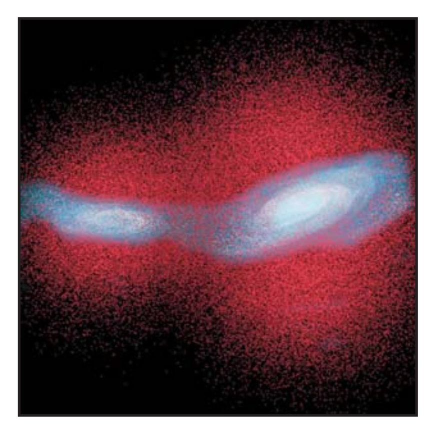
4 A medida que el derrumbe progresa, la zona alcanza un equilibrio. La densidad, tanto de la materia común como de la oscura, tiene su máximo en el centro y decrece hacia el exterior.



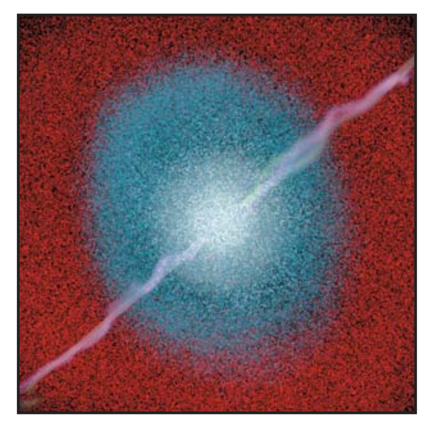
5 La materia oscura, que no radia, mantiene su estructura. Pero la materia común sí emite energía; en su derrumbe toma la forma de un disco rotativo que va condensándose en estrellas.



6 Las protogalaxias interaccionan; se imparten unas a otras momentos angulares y se fusionan, creándose entes cada vez mayores. (Este paso es coetáneo con los pasos 4 y 5.)



7 Cuando se fusionan dos discos de tamaño parecido las órbitas de las estrellas se desordenan. Nace una galaxia elíptica. Es posible que con posterioridad se desarrolle un disco a su alrededor.



8 Las fusiones galácticas desencadenan la formación de nuevas estrellas y proporcionan material al agujero negro central; se crea así un núcleo galáctico activo, que arrojará chorros de plasma.

DON DIXON

alrededores. En un cierto momento, el exceso de densidad de una región, comparada con las cercanías, llega a tal magnitud, que su atracción gravitatoria supera a la expansión cósmica. La región empieza a derrumbarse sobre sí misma.

Hasta ese instante la región no constituye un objeto coherente; se trata de un mero incremento aleatorio de la densidad en la bruma que llena el universo. Pero una vez empieza su contracción, o “colapso”, adquiere una vida interna propia. El sistema —al que llamaremos protogalaxia desde ahora— busca un equilibrio. Se denomina a este proceso “relajación”. Los bariones se comportan como las partículas de cualquier gas. Calentados por las ondas de choque originadas en el colapso, intercambian energía en las colisiones que se producen entre ellos; se llega así a un equilibrio hidrostático, un equilibrio entre la presión y la gravedad. La atmósfera de la Tierra también está en equilibrio hidrostático (o casi), razón por la cual la presión disminuye exponencialmente con la altitud.

En la materia oscura, sin embargo, la relajación procede de un modo peculiar. Las partículas de MOF son, por definición, muy poco interactivas; no se redistribuye la energía entre ellas mediante colisiones. Un sistema compuesto por estas partículas no alcanzará un equilibrio hidrostático, sino que pasará por una —en expresión más bien contradictoria— relajación violenta. Cada partícula no intercambiará energía con otra partícula individual, sino con el conjunto de partículas por medio del campo gravitatorio.

Los cuerpos que se mueven por un campo gravitatorio están siempre canjeando energía gravitatoria por cinética, o viceversa. Si se lanza una pelota al aire, subirá cada vez más alto, pero a la vez se irá frenando: ganará energía gravitatoria a expensas de la cinética; cuando caiga, ganará energía cinética a expensas de la gravitatoria. Las partículas de la MOF de una protogalaxia se comportan de una forma parecida. Mientras se mueven, se va modificando su velocidad conforme cambia el balance de su energía cinética y su energía gravitatoria. Pero al contrario que una pelota cerca de la superficie terrestre, las partículas de la MOF vagan en un campo gravitatorio que no es constante. Al fin y al cabo, el campo gravitatorio está generado por el conjunto de las partículas que participan en el colapso.

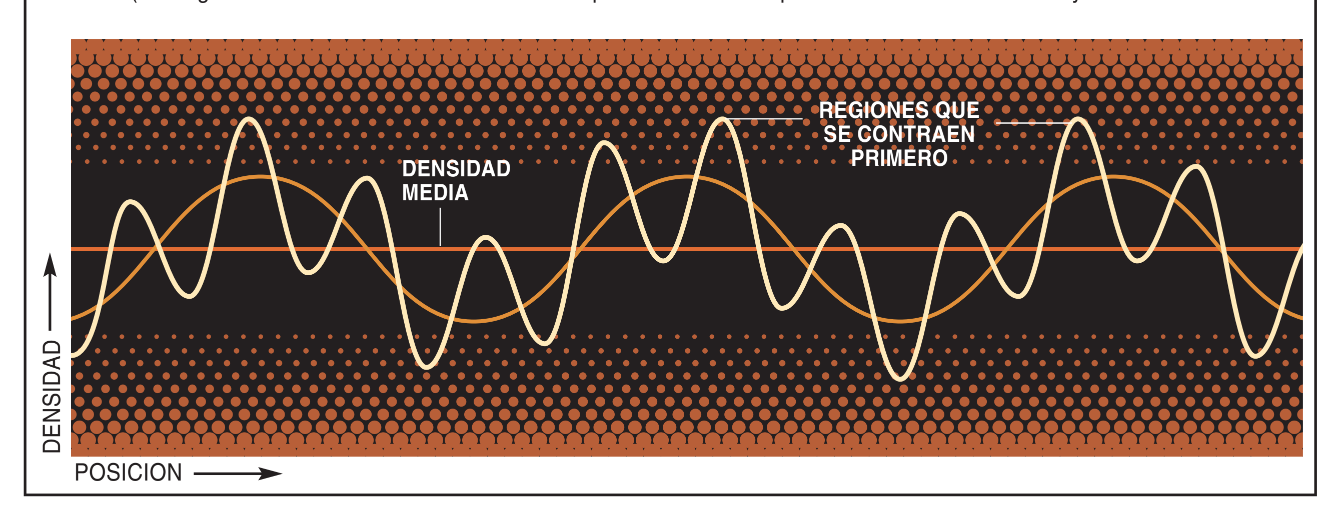
Los cambios en el campo gravitatorio llevan a algunas partículas a ganar energía y a otras a perderla. Tal y como ocurre con los bariones, el sistema se relaja gracias a esta redistribución de la energía de las partículas y se crea un halo de MOF en un estado de equilibrio denominado virial. El proceso es complejo y nunca se ha desarrollado teóricamente en detalle. A falta de una análisis riguroso, se intenta reproducirlo con simulaciones, que muestran que todos los halos de MOF en equilibrio virial tienen distribuciones de densidad similares.

El punto final del colapso y relajación de una protogalaxia es el halo de materia oscura, en cuyo interior se encuentra el gas bariónico en equilibrio hidrostático a una temperatura de unos millones de grados. Cada partícula de la MOF conservará su energía a partir de este momento; el gas bariónico, en cambio, emitirá radiación, se enfriará, se contraerá y se acumulará en el centro del halo de materia oscura. El enfriamiento es la causa del desacoplo entre bariones y la MOF.

Hasta ahora hemos considerado la formación de una galaxia aislada, ignorando su entorno. Cerca se constituirán otras galaxias. La gravedad las aproximará hasta que se fusionen en una estructura mayor. Esta estructura también se fusionará con otras, y así sucesiva-

LAS VARIACIONES DE LA DENSIDAD GALACTICA

Las variaciones de densidad en el universo pregaláctico siguieron una pauta que facilitó la ulterior formación de protogalaxias. Consistían en ondas de varias longitudes de onda superpuestas a un “ruido rosa” (se originaron como ondas de sonido en el plasma primordial): una onda pequeña se superponía a otra un poco mayor, y así sucesivamente. Las mayores densidades, pues, se daban en regiones muy pequeñas. Fueron las que primero se contrajeron y convirtieron en elementos componentes de estructuras mayores.



mente. La construcción jerarquizada caracteriza a los modelos de MOF. La razón es muy simple. Puesto que las fluctuaciones a pequeña escala de la densidad se superponen a las de escalas mayores, la densidad alcanza su máximo valor en las regiones menores. Cabe una analogía con la cima de una montaña. La posición exacta del pico coincide con una estructura diminuta: una china, digamos, en una piedra arriba de una cuesta en lo más alto del monte. Si un banco de niebla se echa encima de la montaña, primero se esfumará la china, luego la piedra, después el repecho y por último el monte entero.

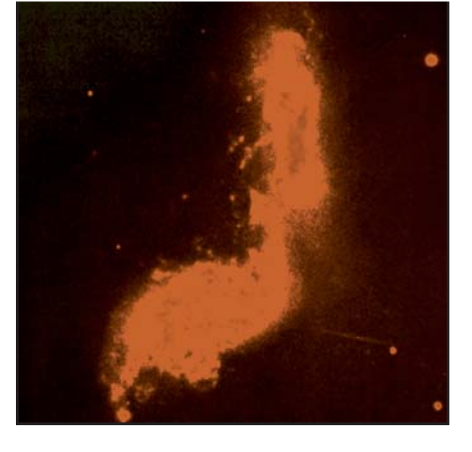
De forma similar, las regiones más densas del universo temprano son las protogalaxias más pequeñas, las primeras regiones que se han desplomado sobre sí mismas, seguidas por estructuras cada vez mayores. Lo que distingue a la MOF de otros tipos posibles de materia oscura es que experimenta fluctuaciones de densidad a todas las escalas. Los neutrinos, por ejemplo, carecen de fluctuaciones a escalas pequeñas. Un universo dominado por los neutrinos sería como una montaña con una cima llanísima.

No podemos describir con relaciones matemáticas sencillas la formación jerárquica de los halos de materia oscura. Hemos de recurrir a simulaciones numéricas. Para simular una parte del universo con una resolución que permita estudiar la formación de halos individuales se utilizan los superordenadores. Las propiedades estadísticas y la distribución espacial de los halos resultantes concuerdan muy bien con las de las galaxias observadas, lo que constituye un sólido respaldo del modelo de formación jerárquica y de la existencia de la MOF.

El papel de la rotación

La construcción jerarquizada explica de forma natural la diversidad de las estructuras galácticas. En las galaxias espirales, las estrellas y el gas recorren órbitas circulares. Su estructura, pues, está gobernada por el momento angular. ¿De dónde procede ese momento? Según la hipótesis más común, cuando el universo se llenó de protogalaxias, ejercieron, unas sobre otras, fuerzas de marea que les impartieron un movimiento de rotación. Una vez se produjo el colapso de las protogalaxias, cada una quedó con una cantidad determinada de momento angular.

A medida que el gas de las protogalaxias se enfriaba, fue contrayéndose y cayendo hacia el centro. Así como los patinadores sobre hielo giran más deprisa cuando cierran los brazos, el gas rota más y más deprisa a medida que se contrae. El gas se aplanaba, por la misma razón que la Tierra es una esfera algo achatada, y con el tiempo giró tan rápido que la fuerza centrífuga (dirigida hacia afuera) igualó a la atracción gravitatoria (dirigida hacia dentro). Para cuando se alcanzó este equilibrio centrífugo, el gas, con su aplanamiento, había adquirido ya forma de disco, tan denso que empezó a coagularse y crear nubes, donde se formaron las estrellas. Nacía así una galaxia espiral.



Puede que se esté observando directamente por primera vez la formación de galaxias elípticas.

DEL *ATLAS OF PECULIAR GALAXIES*, DE HALTON ARP *(Instituto de Tecnología de California, 1966)*; nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Arp/frames.html *(galaxias en colisión Arp 270)*

Puesto que la mayoría de los halos terminan con algún momento angular, es natural preguntarse por qué no todas las galaxias son espirales. ¿Cuándo aparecen las elípticas? Desde hace mucho se enfrentan dos puntos de vista. Según uno de ellos, la mayoría de las estrellas de las galaxias elípticas y de los bulbos actuales se formaron en las primeras épocas con un colapso de una pieza. Según el otro, las elípticas son productos posteriores, resultado de la fusión de galaxias espirales.

Este segundo punto de vista goza de una aceptación creciente. Las simulaciones por computadora de la fusión de dos espirales muestra que las enormes fluctuaciones del campo gravitatorio terminan por destruir ambos discos. Las estrellas de las dos galaxias están demasiado separadas como para chocar entre sí; el proceso de fusión recuerda a la relajación violenta de la materia oscura. Si las masas de las galaxias se parecen, se engendrará una acumulación regular de estrellas con unas propiedades muy semejantes a las de una galaxia elíptica. Una cantidad considerable del gas de los discos de las dos galaxias originales perderá su momento angular y se desplazará hacia el interior. Allí alcanzará densidades muy altas; comenzará una intensa generación de estrellas. Puede que más tarde vuelva a caer gas, se enfríe y construya un nuevo disco alrededor de la elíptica. Habrá aparecido con ello una galaxia espiral con un bulbo en el centro.

El gran rendimiento de la formación de estrellas durante las fusiones galácticas explica que las galaxias elípticas carezcan de gas: lo han consumido. Las fusiones explican también la relación entre morfología y densidad: una galaxia en un medio muy denso conocerá varias fusiones y, por tanto, será más probable que acabe elíptica.

La observación confirma que estas fusiones e interacciones fueron comunes en el universo, sobre todo en sus principios. En las imágenes del telescopio espacial Hubble, muchas galaxias antiguas presentan morfologías perturbadas, huella de una interacción. Es más, el número de galaxias con brotes de formación de estrellas —en los que se crean estrellas a un ritmo frenético— aumenta muchísimo cuando se observan épocas tempranas. Quizás estemos asistiendo directamente, por primera vez, a la formación de galaxias elípticas.

Si las galaxias elípticas y los bulbos de las espirales están ligados a las fusiones galácticas, será también muy posible que durante su construcción se creen agujeros negros supermasivos. Se da una sorprendente correlación de la masa de los agujeros negros con la masa de la elíptica que los alberga o del bulbo; pero no existe correlación con la masa del disco. Se han

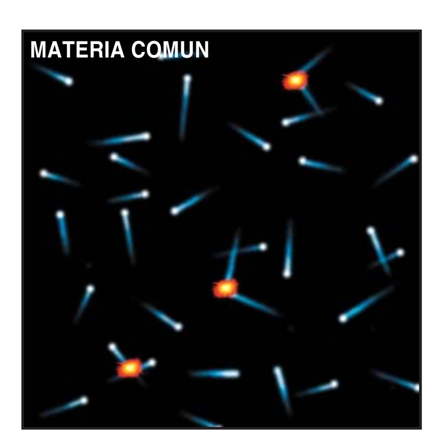
ampliado los modelos de fusión para que incorporen agujeros supermasivos y, por tanto, NGA. El abundante gas que se inyecta en el centro durante la fusión galáctica puede revivir un agujero negro dormido. En otras palabras: los cuásares abundaban más en el pasado porque eran más frecuentes las fusiones galácticas.

¿Qué decir de las galaxias enanas? Figuran en el esquema jerárquico como residuos, pequeñas aglomeraciones que no han conocido todavía una fusión. Las observaciones más recientes descubren que la formación estelar procede en ellas de manera bastante errática, mediante brotes cortos separados por largos períodos tranquilos [*véase* "Galaxias enanas y brotes de formación estelar", por Sara C. Beck; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2000]. En galaxias más pesadas, como la Vía Láctea, la formación de estrellas tiene lugar a un ritmo más o menos constante. Estos resultados sorprenden porque se ha supuesto a menudo que la masa de una galaxia determinaba su fertilidad. Pero en una galaxia ligera las explosiones de las supernovas agitan, si no eliminan, el gas del sistema e impiden la formación estelar. Hasta la perturbación más pequeña puede tener un efecto demoledor. Quizá sea esta sensibilidad a las condiciones iniciales y a los sucesos aleatorios la causa de la heterogeneidad de las galaxias enanas.

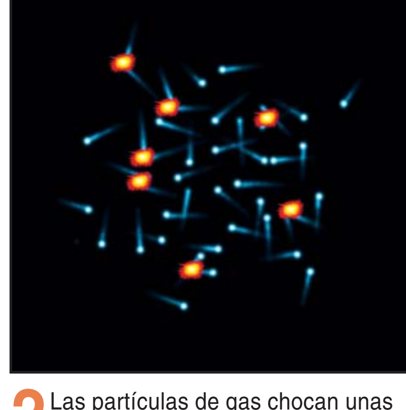
A pesar de los notables éxitos de esta concepción establecida de la formación de galaxias, se está lejos de comprender todos los procesos que intervienen. Es más, aún quedan por resolver algunas incongruencias preocupantes. La simple idea del gas que se enfría dentro de un halo de materia oscura se topa con una

LA RELAJACION GALACTICA

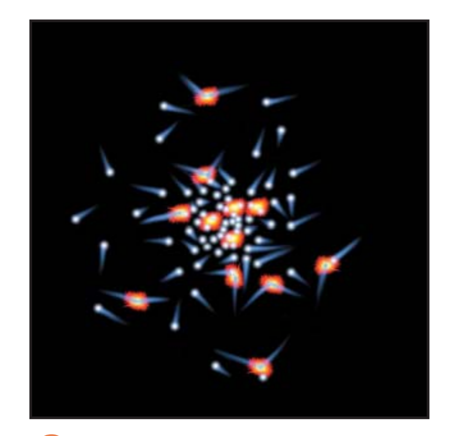
Una galaxia es un objeto bien definido —y una parcela arbitraria del espacio— gracias a un estado interno de equilibrio que fija sus propiedades globales: morfología, distribución de su densidad. (Un equilibrio similar determina la temperatura y tamaño de las estrellas.) La materia común y la oscura alcanzan el equilibrio por vías diferentes.



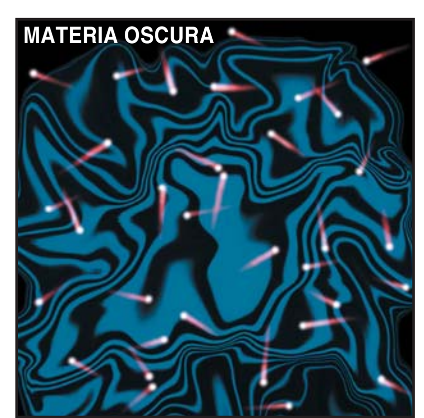
1 La materia común —constituida, sobre todo, por gas de hidrógeno— se mueve en un principio en cualquier dirección. La densidad varía aleatoriamente.



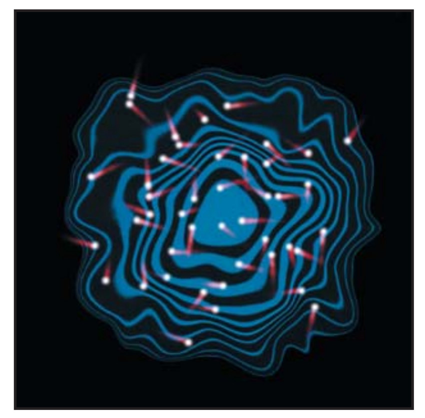
2 Las partículas de gas chocan unas con otras; la energía se redistribuye y se genera una presión que se opone a la gravedad.



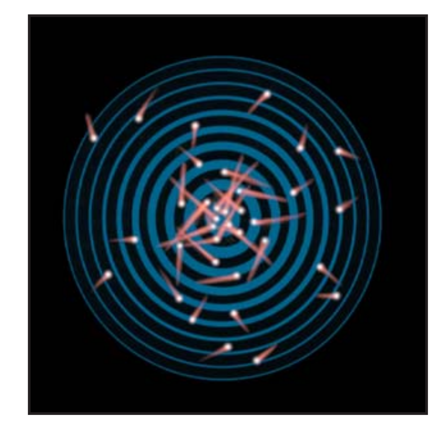
3 Con el tiempo, el gas alcanza un equilibrio hidrostático; en él la densidad es mayor cerca del centro de gravedad.



1 Al principio, la materia oscura presenta la misma distribución que la materia común. La diferencia estriba en que las partículas no colisionan.



2 A medida que las partículas se mueven, el campo gravitatorio se modifica y las partículas ganan o pierden energía.



3 Gradualmente, el sistema alcanza un equilibrio virial, en el que el campo gravitatorio no vuelve a fluctuar.

DON DIXON

dificultad de consideración: la catástrofe del enfriamiento. De acuerdo con los cálculos del ritmo de enfriamiento, el gas tendría que haberse enfriado deprisa y depositado en el centro de los halos. El espacio intergaláctico se habría vaciado así casi por completo; y, sin embargo, dista mucho de ser un vacío. Alguna fuente extra de energía debió de impedir que el gas se enfriara deprisa.

Posibles respuestas

¿Qué pasa con el momento angular? La cantidad de momento angular que los modelos imparten a las protogalaxias es parecida a la que se les mide hoy a las espirales. Mientras el gas retenga su momento angular, podrá la hipótesis de la MOF reproducir los tamaños observados de las espirales. Ahora bien, en las simulaciones se pierde momento angular; durante las fusiones galácticas, una gran parte se transfiere a la materia oscura. La consecuencia es que el tamaño de los discos generados por las simulaciones se queda en un décimo del real. Parece que los modelos olvidan algún componente esencial.

Hay una tercera incongruencia, que concierne al número de galaxias enanas. Las teorías jerárquicas predicen una abundancia de halos poco pesados de materia oscura y, por extensión, de galaxias enanas. Pero no se ve tal abundancia. El número de enanas de poca masa en los alrededores de la Vía Láctea es de diez a cien veces menor de lo que la teoría predice. O bien esos halos de materia oscura no existen, o bien escapan a la detección porque no se forman estrellas en su interior.

Se han sugerido varias soluciones para estos problemas. Las propuestas entran en dos categorías: las que se decantan por un cambio fundamental de modelo, relativo quizás a la naturaleza de la materia oscura, y las que revisan la conversión del gas en estrellas. Pocos son partidarios de abandonar el modelo de la MOF; funciona muy bien para escalas mayores que las galaxias. La mayoría centra sus esfuerzos, pues, en la formación estelar. No obstante, las simulaciones actuales no incluyen este proceso, que ocurre a escalas mucho menores que las galácticas. Incorporar la formación estelar con todo detalle supera la capacidad de los superordenadores actuales.

Y, sin embargo, la formación de estrellas afecta profundamente a la estructura de la galaxia [*véase* "El gas entre las estrellas", por Ronald J. Reynolds; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2002]. Algunos piensan que el efecto de las estrellas podría solventar los tres problemas a la vez. La energía que ceden calienta el gas; se eliminaría la catástrofe del enfriamiento. El calentamiento frena además el descenso del gas desde el exterior hacia el centro de la galaxia y, por tanto, reduce la transferencia de momento angular a la materia oscura, con lo que se aliviaría el problema del momento angular. Y las explosiones de las supernovas expulsarían masa de las galaxias al medio intergaláctico [*véase* "Explosiones galácticas", por Sylvain Veilleux, Gerard Cecil y Jonathan Bland-Hawthorn; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1996]. En el caso de los halos de masa menor, donde la velocidad de escape es pequeña, el proceso podría ser tan eficiente, que apenas se engendrarían estrellas; se explicaría así por qué se observan menos galaxias enanas de las esperadas.

Las explosiones de las supernovas podrían expulsar materia de las galaxias pequeñas con tanta eficiencia que apenas nacerían estrellas en ellas.

GERALD CECIL ET AL. *Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill* Y NASA *(superburbuja en NGC 3079)*

Dado nuestro precario entendimiento de todos estos fenómenos, quedan bastantes lagunas en los modelos. Aún está por ver si los problemas se solventarán o si, por el contrario, demandarán un marco nuevo. Nuestra teoría de la formación de las galaxias evolucionará con el tiempo. Los rastreos que se están llevando a cabo, como el "Estudio Digital Sloan de los Cielos", facilitarán datos mejores tanto de las galaxias cercanas como de las distantes. Los avances de la cosmología fijarán más las condiciones iniciales de la formación galáctica. Las observaciones precisas de la radiación del fondo cósmico de microondas han determinado ya con precisión los valores de los parámetros cosmológicos a gran escala, así que los constructores de modelos pueden centrarse ahora en las complejidades que se presentan a escalas menores. Quizás unifiquemos pronto lo grande, lo pequeño y lo mediano en una teoría indivisa de la evolución cósmica.

Bibliografía complementaria

COSMOLOGICAL PHYSICS. John A. Peacock. Cambridge University Press, 1999.

THE FORMATION OF ELLIPTICALS, BLACK HOLES AND ACTIVE GALACTIC NUCLEI: A THEORETICAL PERSPECTIVE. Guinevere Kauffmann, Stéphane Charlot y Martin G. Haehnelt en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Series A, vol. 358, n.º 1772, págs. 2121-2132; 15 de julio de 2000.

THE BIG BANG. Joseph Silk. W. H. Freeman and Company, 2001.

THE MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF GALAXIES. Roberto G. Abraham y Sidney van den Bergh en *Science*, vol. 293, n.º 5533, págs. 1273-1278; 17 de agosto de 2001. Disponible en astro-ph/0109358.

THE ANGULAR MOMENTUM CONTENT OF DWARF GALAXIES: NEW CHALLENGES FOR THE THEORY OF GALAXY FORMATION. Frank C. van den Bosch, Andreas Burkert y Rob A. Swaters en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 326, n.º 3, págs. 1205-1215; 21 de septiembre de 2001. Disponible en astro-ph/0105082.

NEW PERSPECTIVES IN ASTROPHYSICAL COSMOLOGY. Martin Rees. Segunda edición. Cambridge University Press, 2002.

GALAXY FORMATION AND EVOLUTION: RECENT PROGRESS. Richard S. Ellis. Seminario impartido en la undécima escuela de invierno del Instituto de Astrofísica de Canarias "Galaxies at High Redshift" (en prensa).

Philip Yam

LINDA A. DETWILER: Contra las vacas locas

"Tápele la nariz, que orinará", explica la veterinaria del Servicio de Inspección Sanita ria Agrónoma y Ganadera (APHIS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) Linda A. Detwiler con un recipiente de plástico en la mano. El ganadero agarra la cabeza de un recalcitrante carnero de 80 kilos bajo un brazo y le oprime el morro con ambas manos. En un momento, el traslúcido bote de muestras se llena hasta la cuarta parte. "¡Qué fácil ha sido!", se sorprende la veterinaria. Está tomando muestras de orina de ovejas sanas de una granja de Nueva Jersey. La petición procede de unos investigadores que quieren crear un análisis de orina que detecte la presencia de un morbo neurodegenerativo de las ovejas, letal sin excepción, el escrapie o tembladera, denominado así porque algunos ovinos afectados se rascan (*scrapie*) hasta despellejarse y por el temblor que les entra. En las vacas se llama encefalopatía espongiforme bovina (EEB), el mal de las vacas locas.

Aparte de deteriorar la economía, la EEB amenaza la salud humana (al contrario que la fiebre aftosa o glosopeda, con la que se la confunde a menudo). Ya se ha cobrado las vidas de unas 120 personas, bajo la forma de una variante que arruina el cerebro: la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. La causa parece ser una proteína priónica de configuración espacial defectuosa que induce a algunos priones normales del organismo a adoptar la conformación patológica. En abril se declaró el primer caso en los Estados Unidos, una mujer de 22 años de Florida que debió de contraer la enfermedad durante su infancia en el Reino Unido.



Linda A. Detwiler: la vigilante de la EEB

TOM WOLFF

La EEB surgió a mediados de los años ochenta. El trastorno, que convierte a los dóciles rumiantes en bestias tambaleantes y agresivas, ha afectado a unas 200.000 reses; millones de animales aparentemente sanos han sido sacrificados como medida de prevención. La epidemia la provocó la agricultura moderna industrial: con gran probabilidad, carne de ovino infectada de *escrapie* entró en la alimentación vacuna a causa de un proceso de transformación que producía pienso a partir de cadáveres. La exportación inadvertida de pienso contaminado propagó la EEB a la cabaña de Japón y gran parte de Europa.

Junto con la Administración de Alimentos y Medicamentos, la USDA se puso en marcha para proteger los rebaños aun antes de que se supiera que la EEB representaba un peligro para el hombre: los Estados Unidos prohibieron la importación de ganado británico en 1989. La normativa no tardó en endurecerse; además se aprobó una ley sobre piensos que no permite que las proteínas de rumiantes se suministren a otros rumiantes (pero sí a los cerdos, los pollos y los animales de compañía).

En los Estados Unidos se vigila la EEB desde 1990. En 1996 Detwiler se convirtió en la coordinadora del programa, atento también al escrapie y otras dolencias relacionadas que afectan a los ciervos y los renos del Oeste. (La denominación general para estos trastornos es la de encefalopatía espongiforme transmisible, EET). También emite informes para los comités asesores nacionales e internacionales. Paul Brown, del Instituto Nacional de la Salud, que lleva estudiando las EET desde los años sesenta, y Stanley B. Prusiner, de la Universidad de California en San Francisco, que ganó el premio Nobel por sus trabajos sobre priones, tienen de ella la mejor de las opiniones

Los afanes del gobierno por mantener los Estados Unidos libres de EEB parece que han dado resultado. Una evaluación del riesgo efectuada por la Universidad de Harvard concluyó el pasado mes de noviembre que la probabilidad de que la enfermedad entre allí es pequeñísima, aunque las industrias se hayan saltado la normativa en alguna que otra ocasión. Pero descubría también que, con los niveles de inspección actuales,

alguna vaca loca podría haber pasado inadvertida. Por eso la APHIS ha incrementado este año el número de análisis de reses de 5000 a 12.500.

"Y todavía es insuficiente", asegura Michael K. Hansen, de la Unión de Consumidores de Yonkers (Nueva York), crítico desde hace tiempo de la política que se sigue con la EET en Estados Unidos. Tanto él como otros señalan el daño que el descubrimiento de la enfermedad causaría a la ganadería bovina, un sector que mueve más de 50.000 millones de euros; les parece que descubrir esa enfermedad no sería ni política ni económicamente bien recibido. (Los tres primeros casos de EEB declarados en Japón han costado al país, según se informa, cerca de tres mil millones de euros). "Ojos que no ven, corazón que no siente", ironiza. Hansen pone como ejemplo de enfoque correcto el adoptado en Europa, donde se realizan análisis en masa de cientos de miles o millones de reses cada año. (En varios países europeos, hay uno o dos casos anuales de EEB por cada millón de cabezas de ganado de edad superior a los dos años.)

El grado de vigilancia no se mide sólo por el número de pruebas, dice Detwiler: "Dependerá de la población que se muestree y de la incidencia de la enfermedad". Estados Unidos se centra en los animales de mayor riesgo: las vacas que padecen trastornos neurológicos y han dejado de andar, porque son las que sufren la mayoría de los episodios de EEB. Allí aparecen al año unas 200.000 vacas de esas características. "Analizando a 12.500 de esos animales, daríamos con la enfermedad si hay un caso por cada millón de cabezas", asegura Detwiler. En los Estados Unidos se quiere determinar sólo si llega la enfermedad; las naciones europeas saben que la tienen y realizan las pruebas "para sacar más animales de la cadena alimentaria", explica.

Puede que analizar en el matadero tenga poco sentido. La EEB tarda en incubarse de cuatro a cinco años; rara vez se dará con una infección mientras la res no tenga más de 32 meses, edad mucho mayor que la habitual de sacrificio (el 88 por ciento se mata antes de los 18 meses). Otros países han caído en la trampa de analizar a los ejemplares muy jóvenes —que casi con seguridad darán negativo— para mejorar las estadísticas generales, señala Detwiler. "Sería un flaco servicio al público que nos pusiéramos a analizar millones de animales en los que fuera poco probable encontrar la enfermedad sólo para dar la impresión de que las cosas van bien. Los análisis no protegen." Ninguno de los miles de cerebros examinados desde que comenzaron los análisis ha mostrado algún indicio de una enfermedad del tipo de la EET en el ganado bovino estadounidense.



En la granja: Detwiler recoge orina de oveja para su análisis ulterior

A pesar del bajo riesgo actual, es posible que Estados Unidos adopte medidas adicionales. Quizá se prohíba un procedimiento de los mataderos: inyectar aire en el cerebro de las vacas; la razón es que la presión del aire puede enviar partículas del cerebro (el órgano más infeccioso, junto con la médula espinal) a los riñones, los pulmones y otras partes no consideradas de riesgo. La USDA está ponderando si prohibir o no el consumo de íleon distal, una parte del intestino que se vende en las tiendas de despojos. Es el único órgano de los animales jóvenes, sin síntomas, con capacidad de transmitir la infección. En el Reino Unido lo destruyen.

Detwiler y sus colegas están evaluando también varios "análisis rápidos" que resultarían apropiados para los Estados Unidos. Un análisis que no necesitara tejido cerebral representaría un gran avance, de ahí la excitación de los investigadores cuando se informó de la detección de proteína priónica en la orina. Las muestras de las ovejas libres de escrapie servirán de control negativo.

Si aparece una vaca loca en suelo norteamericano, Detwiler se convertirá en la cabeza de turco sobre la que recaerán las acusaciones, como el año pasado, cuando la APHIS "diezmó" dos rebaños de ovejas en Vermont. Los progenitores de esas ovejas habían sido importados de Bélgica y Holanda; quizá consumiesen pienso contaminado. Se sacrificó las ovejas; los cuerpos se disolvieron en lejía hirviendo. Los establos y las instalaciones se desinfectaron con hipoclorito sódico o fueron incinerados y los pastos han sido puestos en cuarentena durante cinco años para que se extinga la infección residual.

Las medidas tomadas por la USDA provocaron la queja de que el gobierno actuaba con prepotencia. Detwiler tuvo que ver pancartas que hacían un juego de palabras con su nombre —"Dra. Deathwiler"— y recibir amenazas telefónicas, pero describe la polémica serenamente. Con paciencia, explicó las razones de esas medidas a quienes la llamaron. Sí le sorprendieron las críticas de la prensa. "Arremetían contra el gobierno por no tomar medidas frente a la EEB, y ahora por haberlas tomado. Desde el punto de vista científico, para mí, era un grave riesgo dejar vivas a esas ovejas", que podrían introducir nuevas cepas de escrapie. (Dos de ellas dieron positivo en los análisis.)

A pesar de las pasiones que su trabajo despierta, no se arrepiente. Al principio dudaba si entrar en la USDA "porque había oído decir que sólo los haraganes se meten a funcionarios". Pero ha valido la pena, cree: "Mírense los comités de los que he formado parte y las personas con las que he trabajado; hemos llevado a cabo algunas acciones en determinados momentos gracias a las cuales el peligro se ha conjurado en buena medida".

Complicaciones hepáticas

Prevención del síndrome de isquemia

Pese al avance espectacular registrado por la cirugía hepática en los últimos decenios, quedan todavía muchos problemas por resolver. Uno de los principales es el de la lesión inducida por el síndrome de isquemia-reperfusión (SIR).

El SIR es una consecuencia del largo período que pasa el hígado sin irrigación sanguínea y sin aporte de oxígeno (isquemia). Al restablecerse el flujo sanguíneo (reperfusión) se desencadenan una serie de procesos bioquímicos, en la isquemia y sobre todo en la reperfusión, que inducen un daño celular y repercuten en la función del hígado.

La lesión originada en el proceso de isquemia está asociada a una degradación de la molécula de trifosfato de adenosina (ATP) y a una acumulación de lactato, ocasionada ésta por una aceleración de la glucolisis anaeróbica. Entre los metabolitos responsables del control de la tasa glucolítica, que podrían estar implicados en la acumulación de lactato, destacan el AMP y el AMPc.

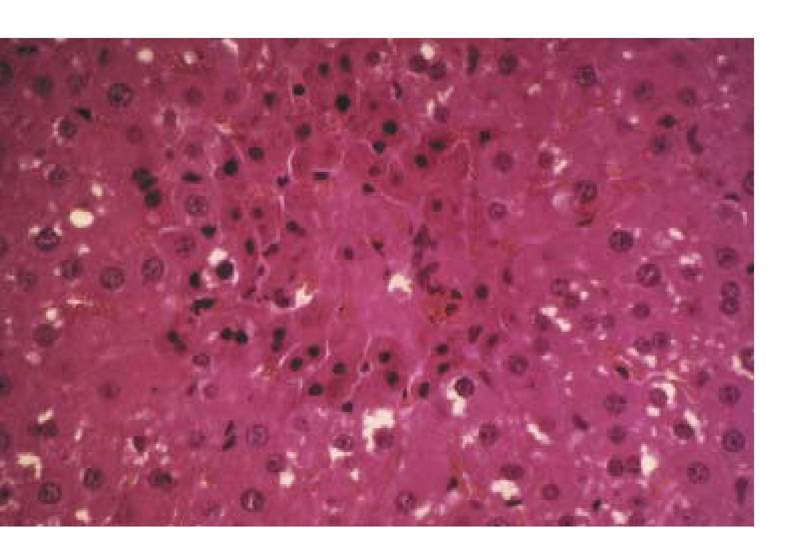
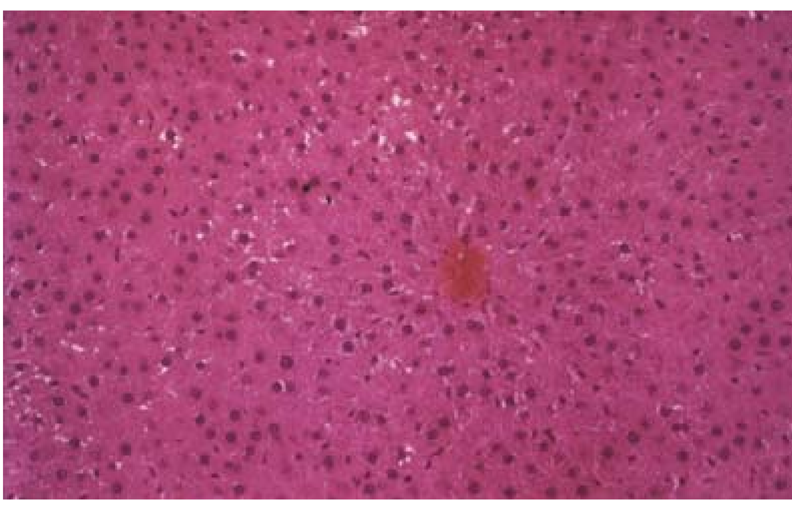
No obstante, es en la reperfusión donde tiene lugar el mayor efecto lesivo del tejido isquémico, ya que en esta etapa se desencadenan una serie de fenómenos inflamatorios en los que se hallan implicados múltiples mediadores de la inflamación, plaquetas, leucocitos y el endotelio vascular, los cuales, al interaccionar entre sí, causan una alteración del parénquima del órgano reperfundido, dando lugar a la lesión inducida por el síndrome de isquemia-reperfusión.

Entre los mediadores inflamatorios destacan diferentes interleucinas; así, el factor de necrosis tumoral (TNF), responsable de la aparición de moléculas de adhesión entre células endoteliales y leucocitos (selectinas e ICAM-1). Ello favorece la acumulación y activación de neutrófilos y la agregación plaquetaria observadas en la lesión por isquemia-reperfusión.

El TNF, un potente inductor de la necrosis y apoptosis hepatocitaria, interviene en el distrés respiratorio del adulto, situación que en el contexto de un fallo multisistémico puede llevar a la muerte del paciente y a la pérdida del injerto. Por ello, cualquier estrategia capaz de reducir los efectos nocivos de la hipoxia, asociados a la degradación de ATP y a la acumulación de lactato, así como de prevenir la síntesis de mediadores proinflamatorios durante la reperfusión hepática, sería útil, no sólo para minimizar la lesión hepática, sino también la respuesta inflamatoria pulmonar asociada a la isquemia-reperfusión hepática. El SIR es la segunda causa de fracaso de un trasplante tras el rechazo inmunitario.

En 1986, Murry y otros observaron que unos breves períodos de isquemia-reperfusión protegían de la lesión inducida por un subsiguiente y más prolongado período de isquemia. Este fenómeno de "precondicionamiento isquémico", descrito inicialmente en el corazón, constituye un mecanismo protector no sólo del miocardio, sino también del hígado, intestino y otros órganos.

En un modelo de isquemia normotérmica en el hígado se ha visto que el precondicionamiento previene los efectos de la isquemia y reduce la síntesis de mediadores inflamatorios (el TNF) durante la etapa de

Corte histológico de un hígado donde pueden apreciarse zonas de necrosis distribuidas en el parénquima hepático, producidas por el síndrome de isquemia-reperfusión (izquierda)*; a su derecha, corte histológico de un hígado sometido a precondicionamiento isquémico. Se observan mínimas lesiones con sólo una incipiente necrosis hepática. En la tinción se ha empleado hematoxilina y eosina. Las imágenes se han obtenido a 215 aumentos*

reperfusión; de ese modo restringe la lesión hepática y pulmonar asociada a la isquemia-reperfusión.

El precondicionamiento durante la etapa de isquemia reduce la degradación de ATP y, con ello, evita el incremento de AMP y AMPc, así como la consecuente acumulación de lactato. En la etapa de reperfusión, el precondicionamiento inhibe la liberación de TNF procedente de las células de Kuffer, lo que atenúa los desórdenes microcirculatorios hepáticos asociados a la isquemia-reperfusión. Además, al disminuir la liberación de TNF en hígado se evita la liberación de TNF por vía sistémica; por tanto, no aumenta la expresión de P-selectina ni se produce la consecuente respuesta inflamatoria pulmonar que va asociada a la isquemia-reperfusión hepática.

Se sabe también que el precondicionamiento es un potente inhibidor de la apoptosis hepatocitaria asociada a la isquemia-reperfusión. De acuerdo con un trabajo reciente, quedó demostrada la efectividad clínica del precondicionamiento en las resecciones hepáticas. Pero se desconoce si este mecanismo podría ser efectivo en el caso de intervenciones quirúrgicas complejas que requieran un tiempo prolongado de isquemia.

No abundan los estudios sobre la eficacia del precondicionamiento en el trasplante experimental de hígado. Ignoramos si este mecanismo podría ser operativo en la clínica para reducir la lesión por isquemia-reperfusión asociada al trasplante hepático.

Las futuras aplicaciones clínicas del precondicionamiento, lo mismo en resecciones hepáticas que en trasplante de hígado, dependerán de la identificación de los mecanismos bioquímicos y moleculares subyacentes al precondicionamiento, del desarrollo de métodos farmacológicos para inducir precondicionamiento y de los resultados que se vayan obteniendo a partir de ensayos controlados en humanos en diferentes desórdenes isquémicos.

C. PERALTA,
J. ROSELLÓ-CATAFAU
y EMILI GELPÍ
Dpto. Bioanalítica Médica
del Instituto de Investigaciones
Biomédicas (CSIC-IDIBAPS),
Barcelona

Formación de imagen

Nuevos métodos de cálculo

El proceso de formación de imágenes es esencial en diversos ámbitos científicos. En óptica, su descripción matemática considera la imagen de un punto objeto a través del sistema formador (normalmente un conjunto de lentes). Conocida esta PSF (siglas de su expresión en inglés *point spread function*) del sistema, la imagen de un objeto cualquiera puede calcularse por descomposición del mismo en puntos emisores elementales.

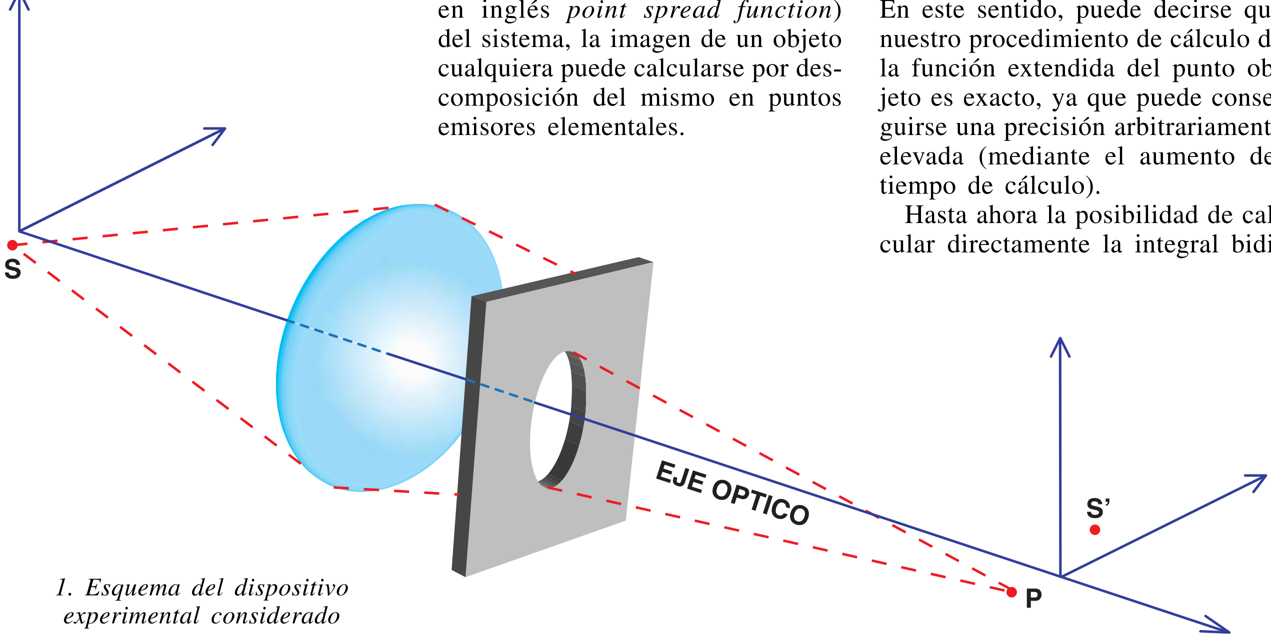
Así pues, el cálculo de la PSF de un sistema óptico a partir de sus parámetros de construcción (curvaturas de las superficies, índices de refracción y posiciones de las lentes) reviste enorme interés científico y técnico. Dicho cálculo se plantea mediante desarrollos analíticos aproximados para describir la deformación de una onda esférica incidente a su paso por las diversas lentes componentes.

Gracias a la potencia creciente de los ordenadores se han conseguido, en los últimos años, importantes avances en la capacidad de cálculo y diseño de sistemas ópticos; han mejorado de una forma extraordinaria las prestaciones de los procedimientos tradicionales.

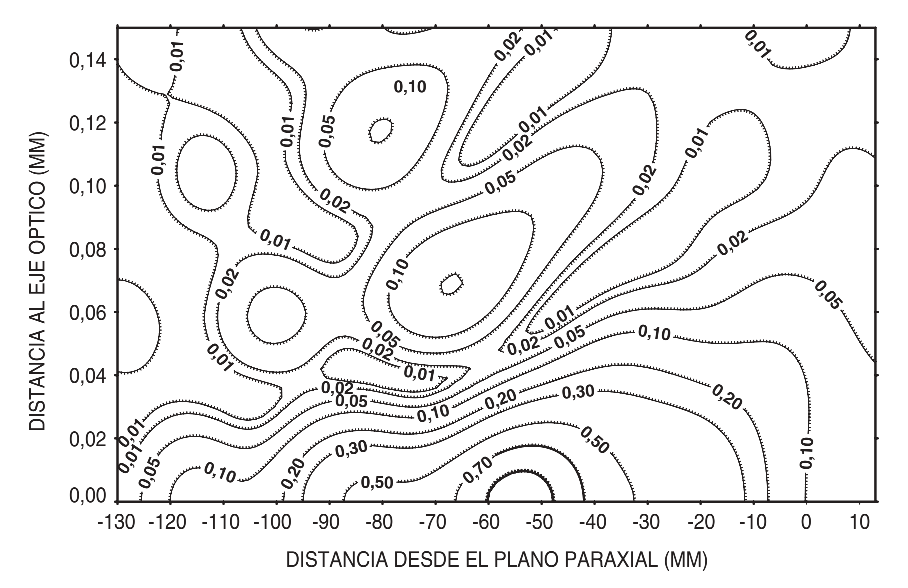
En este contexto, el planteamiento de nuestro método de cálculo es nuevo. No utilizamos el ordenador solamente para calcular con rapidez. Recurrimos al ordenador para calcular por métodos numéricos nuevos.

Dada la expresión matemática que define la PSF (una integral extendida a las dos dimensiones del plano de la abertura del sistema) nosotros no la aproximamos analíticamente, calculando luego a partir de la aproximación (método usual), sino que calculamos numéricamente la integral de partida. Se trata de un planteamiento esencialmente computacional, donde el ordenador y el algoritmo de cálculo numérico evalúan la expresión requerida hasta conseguir un nivel de precisión prefijado. En este sentido, puede decirse que nuestro procedimiento de cálculo de la función extendida del punto objeto es exacto, ya que puede conseguirse una precisión arbitrariamente elevada (mediante el aumento del tiempo de cálculo).

Hasta ahora la posibilidad de calcular directamente la integral bidi-



1. Esquema del dispositivo experimental considerado



2. Líneas de igual intensidad calculadas con nuestro método para objeto en eje, en la zona próxima al plano imagen paraxial. En el eje de abscisas se tiene la distancia (en milímetros, medida desde el plano paraxial). El signo – corresponde a zonas anteriores al plano paraxial y el + a zonas posteriores. El eje Y corresponde a distancias radiales (separación respecto al eje óptico). El valor máximo de intensidad se ha normalizado a 1; puede verse que la zona más intensa está aproximadamente a 55 mm por delante del plano imagen paraxial. Estos cálculos se han comparado con múltiples detecciones en varios planos imagen (en un rango de más de 10 cm de desplazamiento axial). La predicción teórica de esta figura se ajusta bien con las medidas experimentales

mensional que define la PSF sólo se había planteado en casos muy simples, porque el integrando es una función que contiene un término de fase altamente oscilante dentro del recinto de integración, haciendo que los métodos numéricos de integración conocidos no sean convergentes en la práctica.

Nuestro método numérico se fundamenta en una idea avanzada ya por William Thomson (lord Kelvin): el resultado de la integral de una función con fase altamente oscilante depende, sobre todo, de lo que vale la función en los puntos de fase estacionaria, es decir, donde no oscila; así, en cada caso hay que localizar estos puntos de fase estacionaria y utilizarlos para posibilitar la convergencia del método numérico de cálculo. Nuestro procedimiento numérico de cálculo consta de tres fases sucesivas: 1) buscar los puntos de fase estacionaria del integrando de la función que define la PSF, dentro de la abertura del sistema óptico; 2) delimitar, a partir de ellos, las zonas semiperiódicas (es decir, donde la fase varía exactamente en π radianes) y su intersección con la abertura del sistema; 3) sumar las contribuciones de las zonas semiperiódicas necesarias para que se tenga el nivel de precisión prefijado.

La importancia práctica de nuestra aportación se resume en dos ideas principales. Por una parte, permite calcular la PSF de un sistema óptico de modo exacto (es decir, con precisión prefijada), incluso en condiciones geométricas extremas (planos alejados de la zona de foco, zonas extra-axiales, etcétera) donde las aproximaciones de cálculo clásicas carecen de precisión suficiente. Además, nuestros procedimientos permiten comprobar los límites de validez de los métodos de cálculo clásicos.

La comprobación experimental de nuestros métodos se ha realizado con un sistema óptico constituido por una lente y un diafragma circular. El punto objeto real S era el extremo de una fibra óptica (de 4 micras de diámetro), iluminada con láser de helio-neón (de una longitud de onda de 633 nanómetros). Para hacernos una idea más cabal, atendamos a la figura 1. Su imagen ideal (paraxial) correspondería a un punto S'; P representa un punto genérico de cálculo. El detector de las PSF era una cámara de acoplamiento de carga (sin objetivo, 12,4 micras de distancia interpíxel) conectada a un ordenador. Se buscaron las condiciones experimentales adecuadas para que la imagen del punto objeto fuera bastante mayor que el tamaño de píxel, obteniéndose una buena digitalización de la misma.

SALVADOR BOSCH
Y JOSEP FERRÉ-BORRULL
Departamento de Física
Aplicada y Optica
Universidad de Barcelona

Evolución y desarrollo

Genes Hox y la evolución de los vertebrados

Todos los animales dotados de simetría bilateral, desde los insectos hasta los mamíferos, poseen un plano corporal básico compartido. Este diseño, que se establece durante las etapas iniciales del desarrollo embrionario, tiene uno de sus puntos vitales en la especificación de las posiciones a lo largo del eje mayor del cuerpo (antero-posterior), que va desde la cabeza hasta la cola. Los genes pertenecientes a los complejos *Hox* son los principales encargados de llevar a cabo esta función.

En la mosca del vinagre *Drosophila melanogaster* se describió por vez primera ese grupo de genes. Confieren identidad individual a cada segmento del cuerpo del insecto; diferencian segmentos torácicos de los abdominales y discriminan a los segmentos donde se insertan alas de los que desarrollarán patas u otros apéndices. Una característica peculiar de los ocho genes *Hox* de la mosca estriba en su organización en complejo génico, es decir, se hallan situados uno al lado del otro a lo largo del cromosoma.

La sorpresa surgió cuando la misma familia de genes se identificó en ratones y en el hombre. En estos mamíferos, en vez de un solo com-

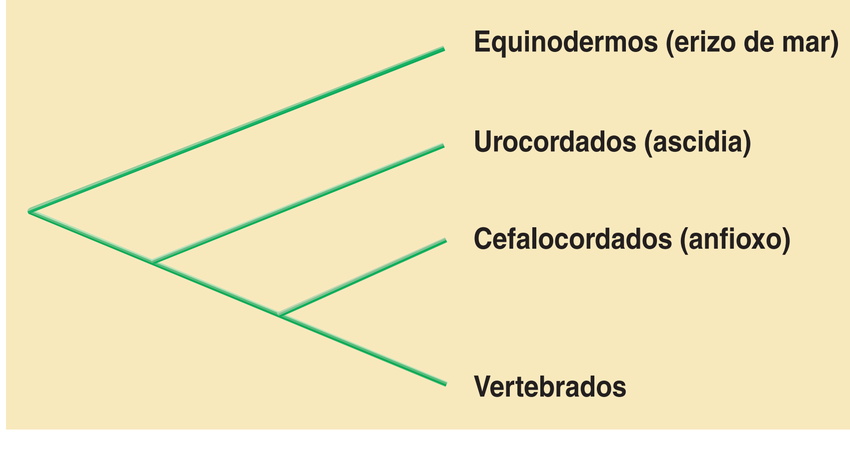
plejo y ocho genes, existen cuatro complejos independientes situados en cromosomas distintos y un total de treinta y nueve genes *Hox*.

Los estudios funcionales realizados en ratón y pollo confirmaron que persistía en vertebrados la función de los genes *Hox* durante el desarrollo, esto es, son responsables de determinar posiciones y estructuras respecto al eje antero-posterior del embrión. (En el argot, están conservados respecto a *Drosophila*.)

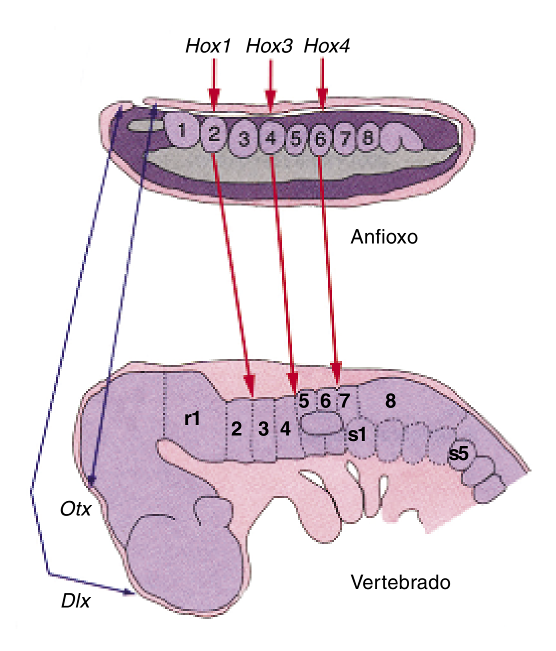
La existencia de un mayor número de complejos se había venido atribuyendo a la posible doble duplicación genómica, total o parcial, que habría afectado al linaje de los cordados durante la evolución de los vertebrados. Pero, ¿posibilitaba la aparición de nuevos genes y complejos *Hox* que surgieran nuevas estructuras y morfologías durante el desarrollo de los vertebrados?

La posible respuesta a la evolución de los complejos de genes *Hox* en vertebrados podría esconderse en el grupo de invertebrados filogenéticamente más cercano, los cefalocordados, que, junto con urocordados y vertebrados, forman el filo de los cordados (*figura 1*). El embrión de un cefalocordado modelo (el anfioxo o lanceta) presenta numerosas características comunes con los vertebrados: notocordio, músculo segmentado en somites, tubo nervioso dorsal y aperturas faríngeas. La identificación de los genes *Hox* de anfioxo confirmó la presencia de un solo complejo (con al menos catorce genes) antes de la aparición de los vertebrados; su expresión a lo largo del eje antero-posterior es extraordinariamente similar a lo observado en vertebrados, como el ratón o el pollo (*figura 2*).

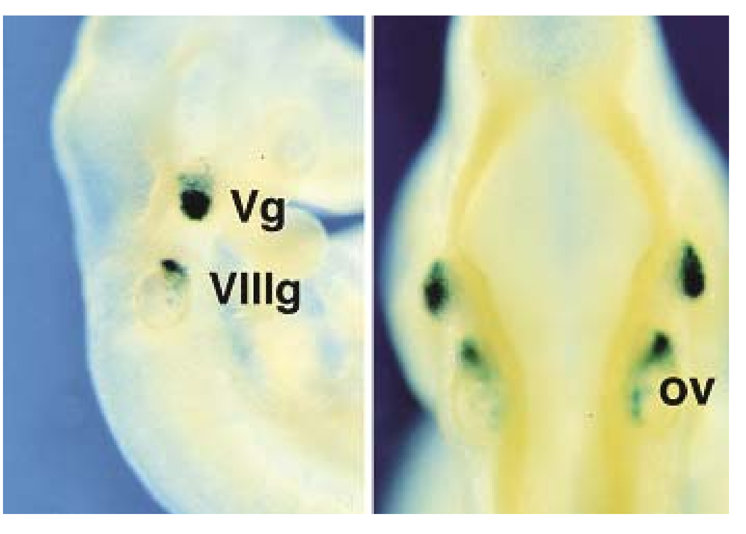
Sin embargo, existen diferencias fundamentales entre el anfioxo y los vertebrados. Estos últimos poseen una columna vertebral y un cráneo óseo, que acompañan a la elaboración y aumento de complejidad morfológica de la parte más anterior del animal, la cabeza. Mientras que en el anfioxo sólo se da una pequeña expansión del tubo nervioso más anterior, la vesícula cerebral, los vertebrados presentan un cerebro altamente estructurado y dividido en unidades segmentales durante parte del desarrollo embrionario. Estos segmentos, los rombómeros, se manifiestan con mayor nitidez en el



1. Relaciones filogenéticas de los deuteróstomos. Los urocordados, cefalocordados y vertebrados forman el filo cordados



2. Diagramas de embriones de anfioxo y vertebrado. Se ponen de manifiesto los límites anteriores de expresión de genes que establecen posiciones en el eje antero-posterior (Dlx, Otx y Hox). La numeración en anfioxo se refiere a los somites (s), mientras que en el embrión de vertebrados indica rombómeros (r) y somites (modificado de Stokes y Holland, "The lancelet", American Scientist, *1998, 86, 552-560)*



3. Actividad de un elemento regulador del complejo Hox de anfioxo en un embrión transgénico de ratón. La expresión se limita al ganglio trigémino (Vg) y acústico (VIIIg), que son estructuras derivadas de la cresta neural y las placodas en los vertebrados, y que no existen en anfioxo

cerebro posterior o romboencéfalo. Se ha demostrado que los límites anteriores de expresión de ciertos genes *Hox* coinciden con rombómeros definidos (*figura 2*) y que su identidad está controlada por estos genes.

Otra novedad evolutiva de los vertebrados, no observada en los cefalocordados, estriba en la presencia de dos tipos de poblaciones celulares: la cresta neural y las placodas ectodérmicas. Ambos tipos intervienen en la formación de la mayoría de las estructuras cefálicas.

La cresta neural se origina en la parte dorsal del tubo neural. Migra hacia la periferia, donde se diferencia en multitud de tipos celulares: células nerviosas, cartílago, músculo o hueso. Las placodas ectodérmicas, por su parte, son engrosamientos del ectodermo. Intervienen en la formación de los ganglios craneales y otras estructuras cefálicas.

Basados en tales propiedades, Carl Gans y Glenn Northcutt postularon en 1983 que el origen de los vertebrados se debió a la aparición de la cresta y las placodas. La identidad de la cresta neural, que se origina en la región del romboencéfalo, está bajo el control de los genes *Hox*; revestía, pues, inmenso interés ver cómo esta nueva función (el anfioxo carece de cresta neural) apareció durante la evolución de los vertebrados.

Con el fin de resolver esa y otras cuestiones, establecimos un plan de colaboración entre el laboratorio de Robb Krumlauf en Mill Hill (Londres) y el de Peter Holland en la Universidad de Reading. En nuestro proyecto experimentador, nos proponíamos, en concreto, sondear la capacidad de los elementos reguladores de la expresión de los genes *Hox* de anfioxo en embriones de vertebrados.

Para ello, se colocaron zonas genómicas del complejo *Hox* de anfioxo junto al gen *lacZ* de bacterias. Se prepararon ratones y pollos transgénicos con estos constructos. La capacidad reguladora es fácil de detectar con una sencilla tinción histoquímica, que revela la actividad del gen bacteriano como un precipitado azul intenso (*figura 3*).

Obtuvimos dos tipos de respuestas sorprendentes. Por un lado, los elementos reguladores de anfioxo operaban en especies muy distantes desde el punto de vista evolutivo, como el ratón y el pollo, llevando la expresión a dominios que correspondían a los genes *Hox* endógenos de vertebrados. Por otro lado, algunos de estos elementos de anfioxo podían dirigir la expresión en la cresta neural y derivados de las placodas de los embriones de vertebrados (como los ganglios trigémino y acústico, *figura 3*).

De estos resultados se desprende que los elementos reguladores de la expresión de los genes *Hox* en la cresta neural y las placodas no aparecieron *de novo* durante la evolución de los vertebrados, sino que estaban ya presentes en su antecesor común con los cefalocordados. Su función primitiva en este ancestro pudiera haber sido regular la expresión en precursores evolutivos de la cresta y placodas; cabe también que desempeñara una misión completamente distinta, y que se hubieran reclutado para nuevas funciones (expresión en la cresta y placodas) durante la evolución de los vertebrados.

Podemos, pues, concluir que existe una conservación evolutiva de los elementos de control de la expresión de los genes *Hox* en el linaje de los cordados y una posterior elaboración, concurrente con su duplicación y la aparición de la cabeza y estructuras cefálicas en los vertebrados.

MIGUEL MANZANARES
Instituto de Investigaciones
Biomédicas, CSIC, Madrid

Polvo interestelar

Catálisis molecular

La creciente importancia que se reconoce al medio interestelar en la dinámica de las galaxias y formación de estrellas ha recibido recientemente algunas confirmaciones experimentales en relación con la catálisis de moléculas que se produce en el polvo cósmico.

Por observaciones espectrales sabemos que la exigua materia que hay entre las estrellas consta principalmente de gas (hidrógeno atómico o molecular) y sólo el 1 %-2 % de polvo (granos de silicatos, carbono y material orgánico que pueden estar cubiertos de hielos). Se cree que la fuente del polvo espacial se halla en las gigantes rojas, novas y supernovas.



1. Una gigantesca columna, densa y fría, de moléculas y polvo en la nebulosa M16. La elevada densidad oculta la condensación de estrellas en su interior, excepto en la cumbre: aquí la luz de estrellas jóvenes vaporiza el gas menos denso y revela núcleos de formación estelar (las protuberancias)

La abundancia de moléculas en el medio interestelar es un parámetro muy importante para el destino de una región galáctica: las desexcitaciones de átomos y moléculas, después de sus excitaciones por colisiones con otros átomos, moléculas o rayos cósmicos, constituyen el principal mecanismo de enfriamiento de una nube sin ionizar. El enfriamiento origina una contracción de la región, un paso adelante hacia la condensación de nuevas estrellas.

La permanencia de moléculas en el espacio interestelar se ve afectada por rayos ultravioleta (UV) en las nubes difusas y calientes y por rayos cósmicos en las densas y frías. A final de los años sesenta llamó la atención la abundancia de H_2 en regiones calientes y de baja densidad, donde el campo UV producido por las estrellas debería extinguirlo rápidamente. El tiempo para que todo el H_2 desaparezca por fotodisociación, estimado en pocos millones de años, es mucho menor que el tiempo de vida de estas nubes, del orden de de-

cenas de millones de años. Análoga discordancia vuelve a encontrarse en las nubes densas y frías, donde, si bien el campo UV languidece, los abundantes rayos cósmicos deben ejercer un efecto destructivo de comparable intensidad sobre las moléculas. Con frecuencia, aquí se observa no sólo H_2, sino también muchas otras moléculas, incluso algunas muy frágiles bajo la acción de las partículas cósmicas.

En ambos tipos de nubes es necesaria una eficiente recombinación molecular para compensar la acción de las radiaciones destructivas y justificar la estabilidad de su composición química. La clave del problema estriba en explicar la estabilidad de la cantidad de H_2, bien por ser la molécula destacadamente más abundante, bien porque ésta, una vez ionizada por los rayos UV o cósmicos, puede instar otras reacciones en fase gaseosa, capaces de generar la gran variedad de especies moleculares observadas.

Teniendo en cuenta que la formación de H_2 en fase gaseosa, con participación exclusiva de átomos neutros o ionizados, constituye un proceso absolutamente ineficiente, se requiere la intervención de un tercer cuerpo para catalizar la reacción.

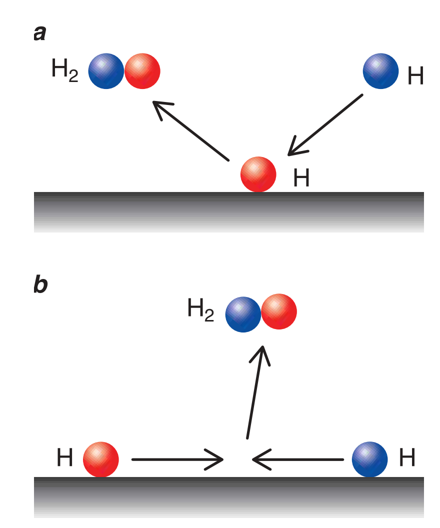
Ya a principios de los años setenta se propuso como catalizador el polvo; los átomos aterrizados en la superficie de los granos se recombinarían según dos modalidades. Aunque la posibilidad teórica de esta hipótesis fue poco después demostrada por Hollenbach y Salpeter mediante un modelo cristalino de la superficie, hasta hace pocos años faltaba una comprobación experimental del proceso.

Esta laguna, junto a la consideración de que la más probable estructura del polvo cósmico fuera amorfa y no cristalina, ha condicionado la aceptación de la idea. Muchos astrofísicos siguen todavía considerando misteriosa la presencia de H_2 en las regiones galácticas con importante campo de radiación.

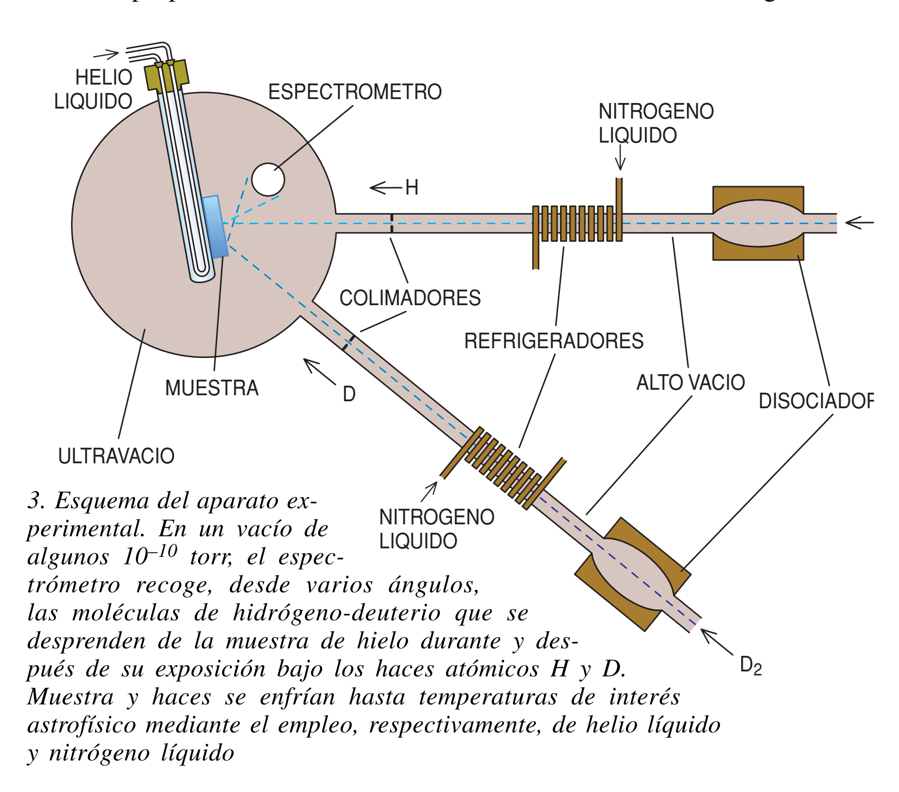
En 1996 un equipo dirigido por V. Pirronello y G. Vidali, de la Universidad de Syracuse, midió la síntesis de H_2 sobre muestras de carbono amorfo y olivina (una mezcla de silicatos) expuestas a hidrógeno atómico, en condiciones cercanas a las presentes en las nubes de baja densidad. El porcentaje de hidrógeno recombinado se reveló similar al porcentaje que, en estas nubes, debe desaparecer por fotodisociación.

En el año 2000, cuando me uní al grupo, realizamos un experimento análogo para examinar la catálisis de H_2 en el polvo interestelar de las nubes densas, donde los granos se cubren con mezclas de hielos (H_2O, CO, CO_2, CH_4 y NH_3). Nos limitamos a utilizar muestras de hielo de agua de estructura amorfa, enfriadas por helio líquido a las temperaturas de interés astrofísico (10-15 kelvin). En lugar de revelar H_2, presente incluso en los más altos vacíos, además de contaminar el haz atómico H, medimos la producción de moléculas de hidrógeno-deuterio, teniendo en cuenta la pequeña diferencia de su probabilidad de síntesis con respecto a H_2. Por esta razón irradiamos la muestra con dos haces atómicos, uno de H y otro de D. Esta idea fue clave para la factibilidad del experimento.

Nuestras mediciones indican una eficiencia de recombinación molecular del hidrógeno muy cercana al valor necesario para compensar las disociaciones causadas por los rayos cósmicos. Los dos experimentos descritos demuestran el papel activo desempeñado por el polvo interestelar en la síntesis molecular y representan un impulso significativo para la solución del problema de la cuasi-estabilidad química de las nubes moleculares.



2. Dos posibles modalidades de catálisis de H_2 en el polvo. En (a)*, un átomo H colisiona con otro ya en la superficie reaccionando inmediatamente (mecanismo directo). En* (b)*, los átomos adsorbidos por la superficie se mueven sobre ésta y reaccionan al encontrarse (mecanismo indirecto).*



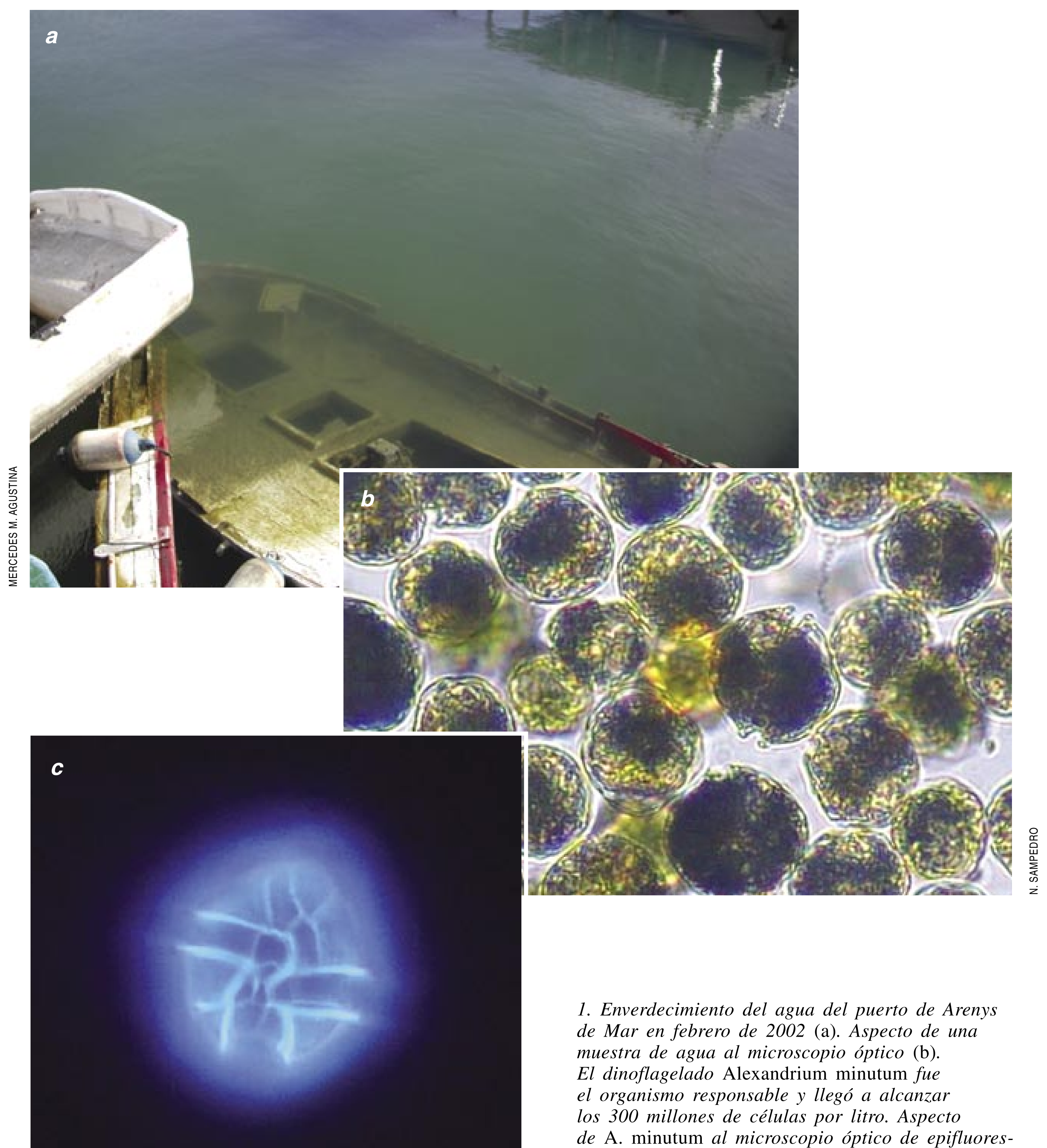
3. Esquema del aparato experimental. En un vacío de algunos 10^{-10} torr, el espectrómetro recoge, desde varios ángulos, las moléculas de hidrógeno-deuterio que se desprenden de la muestra de hielo durante y después de su exposición bajo los haces atómicos H y D. Muestra y haces se enfrían hasta temperaturas de interés astrofísico mediante el empleo, respectivamente, de helio líquido y nitrógeno líquido

GIUSEPPE RAGUNÍ
Universidad Católica de Murcia

DE CERCA

Magda Vila y Raúl Torán

Cuando el mar cambia su color



1. Enverdecimiento del agua del puerto de Arenys de Mar en febrero de 2002 (a). *Aspecto de una muestra de agua al microscopio óptico* (b). *El dinoflagelado* Alexandrium minutum *fue el organismo responsable y llegó a alcanzar los 300 millones de células por litro. Aspecto de* A. minutum *al microscopio óptico de epifluorescencia* (c). *Se trata de una especie tóxica, que presenta toxinas paralizantes*



2. El dinoflagelado Dinophysis sacculus *contiene toxinas diarreicas; sus efectos nocivos se dejan sentir incluso a concentraciones muy bajas, de sólo 200 a 100 células por litro, muy lejos de poder colorear el agua*

A veces, cerca de la costa y durante los meses más cálidos, el agua del mar deja de ser azul y presenta colores verdes, marrones, blanquecinos e incluso rojizos. Estos cambios cromáticos del agua están causados por el crecimiento desmedido de determinadas algas microscópicas del plancton (fitoplancton) ante condiciones ambientales favorables y, en determinados casos, por su acumulación. Estas proliferaciones de fitoplancton reciben la denominación vulgar de mareas rojas. Una expresión poco acertada, si tenemos en cuenta que los cambios de color no tienen nada que ver con el nivel del mar, ni es siempre rojo el color que toma el agua. El color depende principalmente de los pigmentos dominantes del alga proliferante y de su concentración.

Pese a su carácter llamativo, tales cambios de color muchas veces son inocuos, aunque hay en el plancton determinadas especies productoras de toxinas (paralizantes, diarreicas, amnésicas y otras), algunas de las cuales poseen un potencial tóxico tan elevado, que dañan incluso en concentraciones celulares muy bajas, que no llegan a colorear el agua.

Los mejillones, almejas, navajas y otros organismos filtradores se alimentan del fitoplancton. Si en el plancton hay células tóxicas, el marisco acumulará las toxinas que en última instancia afectarán al hombre cuando éste lo ingiera. Pero los moluscos que llegan a los mercados han pasado controles rigurosos para asegurar la ausencia de esas toxinas. Por esta razón es peligroso, y de hecho está legalmente prohibido, recolectar mejillones y otros bivalvos ya sea para la venta o para el propio consumo, sin pasar por los canales legalmente establecidos.



M. VILA (*arriba*); AGENCIA CATALANA DE L'AIGÜA (*abajo, a*) Y LL. CROS Y J. M. FORTUÑO (*b*)

3. Diferencias cromáticas de las aguas del puerto de Tarragona (verde oliva del interior frente al color azul marino que presenta la costa) en agosto de 2001 (a). *Aspecto al microscopio electrónico de barrido de la especie responsable, el cocolitofórido* Calyptrosphaera sphaeroidea (b), *que alcanzó una concentración máxima de 13 millones de células por litro*

Un fuerte romano en

En el oasis de Bahariya, unos restos atestiguan la existencia de un fuerte romano del siglo III. La reconstrucción del texto de la "inauguración oficial", grabado en piedra, ha arrojado luz sobre la política militar romana en Egipto

Frédéric Colin



LUC DELVAUX, *Egyptologica*

El 23 de diciembre de 1819 el explorador Frédéric Cailliaud, de Nantes, y su ayudante salían del oasis de Siwa a lomos de dromedarios. Este enclave se encuentra cerca de la actual frontera entre Egipto y Libia, a 302 kilómetros de pista del Mediterráneo. Acababan de visitar algunos de los yacimientos del país de los amonitas, pueblo célebre en la Antigüedad por albergar el oráculo de Amón, al que acudieron emisarios religiosos de diversas ciudades griegas, Esparta y Atenas entre ellas, y soberanos como Creso, rey de Lidia (del siglo VI antes de nuestra era), o el propio Alejandro Magno, al día siguiente de su conquista de Egipto (en el 332 y 331 a.C.)

Los dos franceses, acompañados de sendos criados, un intérprete y un guía, se incorporaron a una caravana de beduinos que regresaba a Alejandría. Su intención era separase pronto del grupo, en dirección sudeste; querían llegar por una árida pista de 350 kilómetros de longitud a una vasta depresión que Cailliaud identificaba, y tenía razón, con el "Pequeño Oasis" de las fuentes griegas, la actual Bahariya. De repente la caravana se detuvo, asustada al ver en la lontananza una horda de beduinos en actitud quizás hostil. Cailliaud escribió: "Cuando estuvimos a un par de tiros de fusil un *sheij* salió de las filas beduinas y nos hizo señales con un pañuelo rojo. Kurum avanzó también hacia él; el *sheij* le reconoció; ... era amigo suyo, e inmediatamente se echó en sus brazos". En el siglo XIX los exploradores del desierto de Libia tenían que hacer frente a muchas dificultades; Frédéric Cailliaud necesitó nueve días para coronar el acantilado de Bahariya, que cae bruscamente sobre la vasta depresión del Oasis (*véase la figura 1*).

Ante sus ojos se extendía una cubeta árida, en la que algunos palmerales se agrupaban donde había agua. Distinguió un lago. Se ha evaporado; no quedan hoy en el espacio que ocupó más que rocas y arena; pero otras superficies acuáticas han ido apareciendo en distintos lugares gracias a una irrigación que se alimenta de perforaciones profundas. La depresión tiene casi 100 kilómetros de largo y está rodeada de acantilados. Los asentamientos humanos se situaron junto a los puntos de agua, concentrados a su vez en las escasas zonas en que la capa freática era accesible. Entre la depresión, los demás oasis y el valle del Nilo no había más que desierto.

Desde el Imperio Nuevo de los faraones (del siglo XVI al XI a.C.) conocieron los egipcios esta depresión y los asentamientos de su interior como *ouhat mehyt*, es

el desierto de Egipto

decir, el oasis del norte; era unos de los más septentrionales del rosario de oasis del desierto occidental egipcio, paralelo al valle del Nilo. Los autores griegos transcribieron fonéticamente el nombre egipcio como *oasis*, palabra que adoptaron las lenguas europeas y se aplicó pronto a otras regiones del planeta.

El oasis de Bahariya se sitúa en un cruce de caminos que llevan a distintos mundos culturales. Por el noroeste, el itinerario que siguió Cailliaud llegaba hasta Siwa y, más lejos, hasta la Cirenaica, en lo que hoy es la zona oriental de Libia; allá, entre las poblaciones norteafricanas autóctonas, se fundaron algunas ciudades griegas en la segunda mitad del siglo VII a.C. Hacia el este, diversas pistas se dirigían al valle del



1. EL OASIS DE BAHARIYA es una cubeta árida de casi 100 kilómetros de longitud. Se han ido estableciendo asentamientos humanos en algunos puntos de agua desde la Antigüedad. Más allá del acantilado que lo rodea, el desierto se extiende varios centenares de kilómetros hasta llegar a los oasis más cercanos o al valle del Nilo. En el siglo XIX el explorador Frédéric Cailliaud visitó Bahariya y dibujó la puerta romana (*a la derecha*), cuyos restos se encuentran a pocos centenares de metros del emplazamiento del fuerte romano.

Nilo. Para alcanzar los oasis meridionales las caravanas circulaban por Darb al'-Arbayin, *la pista de los 40 días*, que les llevaba hasta el Sudán y las culturas africanas del Sahel. ¿Qué lazos tenía la población antigua de Bahariya, situada en esta encrucijada de caminos, con las tres esferas culturales mencionadas y con el mundo mediterráneo? ¿Conoció el oasis una historia autónoma o siguió el paso de la zona ribereña del Nilo? ¿Qué restos arqueológicos nos dejaron los habitantes del oasis?

Las fortificaciones levantadas por el ejército romano en diversos oasis del desierto de Libia han sido mucho menos estudiadas que las del desierto oriental. Así, un especialista en papiros publicó en 1987 un mapa del oasis de Bahariya en el que situaba ocho "fortalezas y fuertes" romanos; el posterior estudio de los restos arqueológicos y de los papiros ha demostrado que ninguno de esos asentamientos era una construcción militar romana. El reciente descubrimiento de una fortaleza "auténtica" en Qaret el-Toub, lugar situado cerca del probable emplazamiento de la principal localidad del oasis, nos proporciona una información preciosa sobre la ocupación romana del territorio y, en general, sobre las medidas tomadas a finales del siglo III por Diocleciano para controlar la población y proteger las zonas rurales de las incursiones bárbaras.

En 1997, el IFAO (Instituto Francés de Arqueología Oriental) organizó una misión en el oasis de Bahariya; los numerosos yacimientos visitados hicieron concebir grandes esperanzas. Aunque por allí habían pasado viajeros y sabios, se conocía muy poco de algunos de los yacimientos, y de otros no se tenía ni noticia.

En 1998 y 1999 nos centramos especialmente en el descubrimiento en Qaret el-Toub de un gran cementerio faraónico y una gran estructura de ladrillo enterrada que formaba un cuadrado de más de 4000 metros cuadrados. Si nos guiamos por el mapa topográfico de Cailliaud, en el siglo XIX la pista de Siwa debía discurrir exactamente al pie del yacimiento; sin embargo ¡ni el explorador ni sus acompañantes repararon en él! Tampoco ninguno de los arqueólogos que han trabajado en Bahariya lo menciona, pese a que está en el borde de El-Qasr, cerca de muchos yacimientos arqueológicos bien conocidos. Cierto es que, cuando uno se aleja unas decenas de metros, la vasta estructura se funde con los relieves naturales de los alrededores. Sin embargo, el lugar cobijó durante

De la dominación romana a la conquista árabe

Desde la época del Imperio Antiguo egipcio, en el tercer milenio antes de nuestra era, algunos oasis del desierto libio estaban integrados en la esfera cultural y política del Egipto nilótico. La historia de los oasis va unida a la del valle del Nilo.

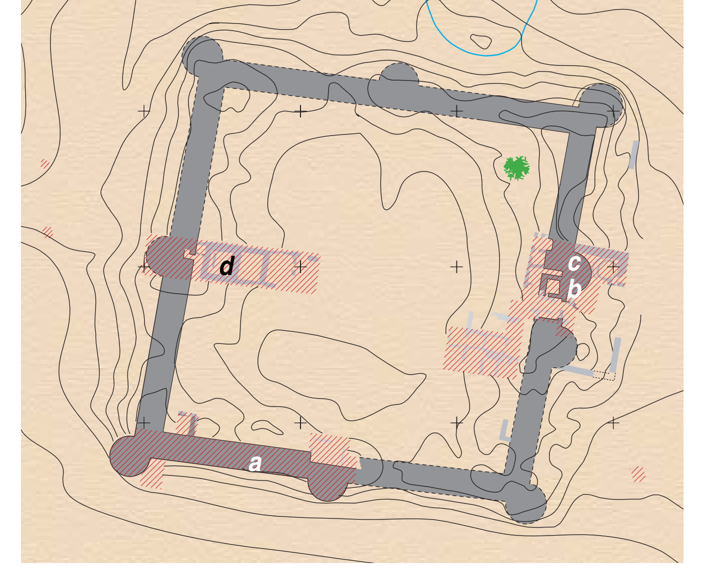
En el 332 a.C. el rey macedonio Alejandro Magno conquistó Egipto, por aquel entonces una provincia o "satrapía" del Imperio persa. Poco después de su muerte, en el 305, el sátrapa macedonio Ptolomeo, que había llegado al poder en Egipto de la mano de Alejandro, se proclama rey. Esto tiene como consecuencia que la lengua principal de la administración y del poder pase a ser el griego. Durante el siglo II a.C. los soberanos de la dinastía macedonia van cayendo progresivamente bajo la influencia política de Roma. En el año 30 a.C. Egipto, gobernado por Cleopatra VII, la última reina macedonia, se transforma definitivamente en provincia romana por obra de Octavio, que bajo el nombre de Augusto funda el Imperio.

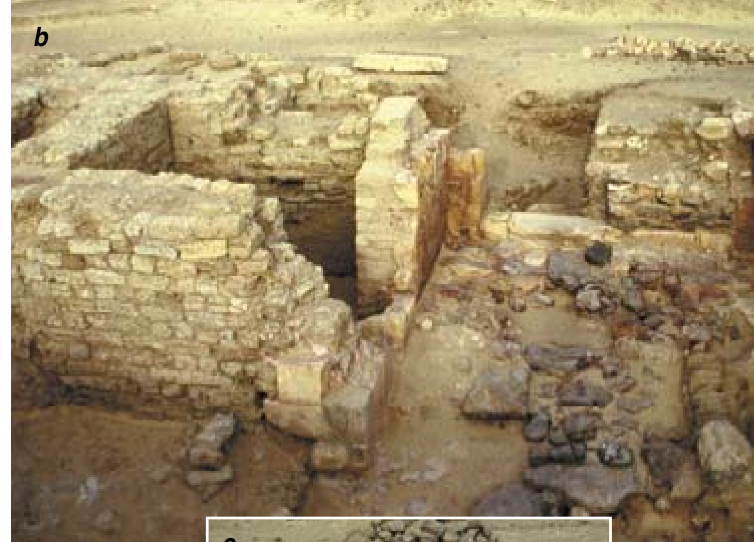
Además de muchas otras formas de ingresos fiscales, Egipto llena las arcas romanas con sus exportaciones de cereales, en especial de trigo. En el país viven tres categorías de hombres libres: en orden decreciente de estatuto tenemos a los ciudadanos romanos (muy minoritarios), a los de las ciudades griegas de Egipto (Alejandría, Naucratis, Ptolemais y Antinópolis) y a los peregrinos, es decir, los demás habitantes libres, ya sean de cultura griega o egipcia. Hasta el siglo III de nuestra era los esclavos y los peregrinos varones pagaban una contribución al fisco romano; la cantidad era menor en el caso de los naturales de las capitales de los distritos egipcios. En el 212 se eleva al rango de ciudadanos romanos a todos los hombres libres del Imperio, fueran cuales fuesen su rango anterior y origen étnico.

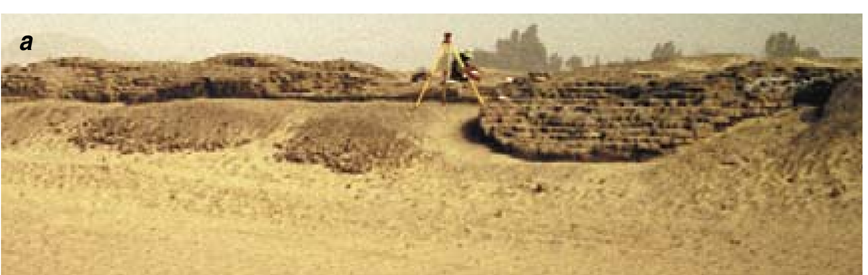
A fin de mantener la cohesión social y organizar la explotación económica del país, la autoridad de Roma se vale de su ejército. Las canteras que explota el Estado están protegidas por campamentos militares; las rutas comerciales que van hacia el Cuerno de Africa y el Indico hallan jalonadas de fuertes que defienden a las caravanas. Parece que durante el siglo III parte de esta red protectora cayó en desuso.

En esa época los bárbaros atacaron el territorio imperial en varios frentes. Egipto se veía amenazado por las incursiones procedentes de Nubia, en el sur, y del desierto libio, en el oeste. Las reformas políticas, militares y económicas efectuadas durante el mandato de Diocleciano (del 284 al 305) marcan una etapa importante en la evolución del Imperio, que va entrando progresivamente en la última gran fase de su historia. El año 312 Constantino se convierte al cristianismo, que irá imponiéndose como la religión oficial del Imperio romano.

La administración y el poder quedan divididos el año 364 entre un Imperio de Oriente y un Imperio de Occidente. Egipto entra a formar parte de la zona oriental, con capital en Constantinopla, ciudad fundada sobre el emplazamiento de la antigua Bizancio. En el 391 el emperador Teodosio prohíbe definitivamente los cultos paganos. El final del dominio bizantino en Egipto llega cuando, entre el 639 y el 642, los árabes conquistan el país bajo las órdenes del general 'Amr Ibn al-'As. La arabización de los pueblos conquistados no fue inmediata; los cristianos de Egipto, los coptos, sobreviven bajo el nuevo régimen en unas condiciones favorables al menos hasta finales del siglo X.











F. COLIN

2. LA PLANTA GENERAL DEL FUERTE ROMANO se ha descubierto gracias a las excavaciones arqueológicas realizadas en una gran estructura de adobes arrasada; presenta una forma cuadrada de unos 60 metros de lado. Los arqueólogos han despejado los restos del lienzo sur del muro, con la torre central y la torre del ángulo sudoeste (*a*), la puerta del fuerte y el puesto de guardia (*b*), una escalera que baja desde el muro hacia el interior del fuerte (*c*) y dos habitaciones, probablemente de un edificio administrativo y sagrado, en el interior del fuerte (*d*).

la Antigüedad tardía un fuerte de gran importancia para la vida pública, militar y administrativa del Pequeño Oasis.

El estudio de las cerámicas desparramadas por el suelo reveló el predominio de los fragmentos fechados en los siglos IV y VI; los había también de época faraónica (pocos), de los siglos II y III (curso arriba) y de época árabe (curso abajo). Interpretamos antes de la excavación los poco visibles vestigios de la construcción como un establecimiento militar romano, cerrado por cuatro paredes, hoy simples taludes, y quizá provisto de torres, como daba a entender el muñón de una de ellas en el ángulo sudoeste del recinto. Sin embargo, mientras no se excavase eran admisibles otras hipótesis: ¿no estaríamos ante un caravasar relacionado con la antigua pista, o incluso ante una población amurallada? En el caso de ser un fuerte romano, ¿cuál era su tipología? ¿Cuáles fueron las fechas de su fundación y de su destrucción? ¿Hubo una continuidad entre la ocupación romana y bizantina, por una parte, y su posterior uso tras la llegada de los árabes a Egipto, por la otra?

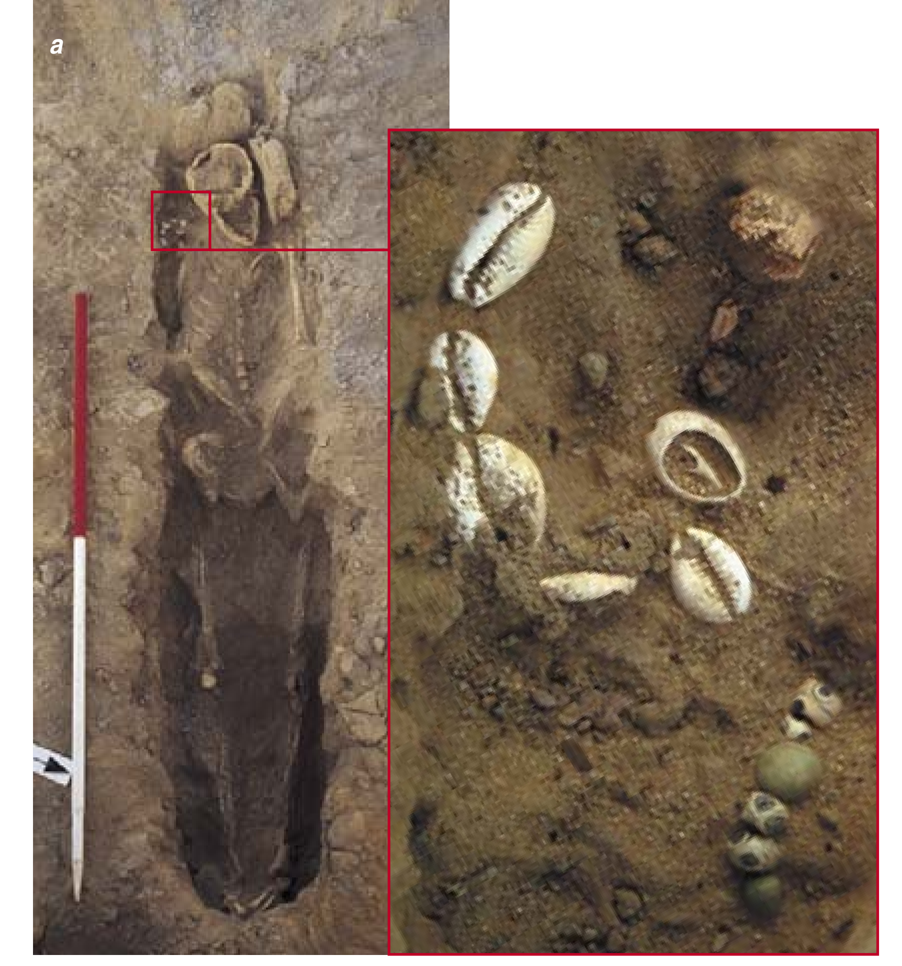
En 2000 y 2001 realizamos una serie de catas estratigráficas en diversos puntos del yacimiento que nos dejaron muy claro que el espacio sobre el cual los romanos edificaron el fuerte —pues se trataba realmente de un fuerte— había sido antes, en época faraónica, un cementerio.

Encontramos una tumba intacta, excavada en el substrato rocoso, apenas a un metro del pie de la torre sudoeste; esta fosa alargada, orientada en dirección noreste/sudoeste, medía 1,7 metros de largo y entre 35 y 40 cm de profundidad. Contenía un esqueleto depositado boca arriba, en mal estado de conservación y sin indicios de momificación. En el extremo sudoeste la cabeza reposaba sobre una pequeña losa de granito. El

lado izquierdo estaba apoyado contra una pequeña losa vertical (*véase la figura 3*).

Un fuerte sobre una necrópolis

La cara estaba aplastada; quería decir que perturbaron el lado sudoeste de la tumba en la Antigüedad, quizá durante los trabajos de construcción del fuerte. Probablemente la persona enterrada en esta tumba era de condición modesta. Los únicos objetos que la acompañaban eran un collar de cuentas y un brazalete de conchas de cauri (un molusco), situados a la derecha de la cabeza. El elemento central del collar era un amuleto de loza verde en forma de ojo mitad de halcón, mitad humano, lo que lo egipcios denominaban ojo *oudjat*, en decir, ojo sano; la conjunción de los diversos elementos de este ojo evocaba, según el pensamiento egipcio, la plenitud y la buena salud, a imagen del Sol o de la Luna llena, concebidos como los dos ojos del dios halcón Horus. El *oudjat* estaba ensartado entre cuentas, de vidrio azul y blanco, de loza verde y azul oscuro, de piedra gris azulada y de cornalina. En cada extremo había un escarabajo decorado. De ciertos elementos del collar se deduce que la tumba se excavó en el Tercer Período intermedio (entre los siglos XI y VIII a.C.); no es extraño encontrar en esta época, y sobre todo en yacimientos de la zona del Delta, tumbas con un ajuar funerario similar. La presencia en el oasis de seis conchas de cauri formando un brazalete es interesante, ya que proceden del Mar Rojo; estos productos semipreciosos se adquirieron, sin duda, en el mercado local del oasis o en un viaje por el valle del Nilo.



3. LAS EPOCAS FARAONICA, ROMANA, BIZANTINA Y ARABE han dejado restos de su paso por el oasis de Bahariya. A un metro de la base de la torre del ángulo sudoeste del recinto se ha encontrado una tumba (*a*). A juzgar por las cuentas depositadas cerca de la cabeza del difunto (*b*), la inhumación se remonta al tercer período intermedio (siglos XI/VIII antes de nuestra era). El elemento central del collar es un amuleto de loza

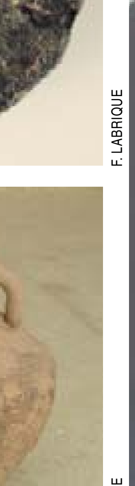
La necrópolis faraónica llevaba mucho tiempo abandonada cuando los romanos delimitaron el espacio sobre el cual construyeron el fuerte. El recinto forma un cuadrilátero casi cuadrado, de unos 65 metros de lado. La entrada principal, protegida a derecha e izquierda por una torre semicircular, se sitúa en el centro del muro este. En cada ángulo hay una torre, al igual que en el centro de los lados norte, sur y oeste. Con la excavación aparecieron las estructuras enterradas, los muros del propio recinto o los edificios interiores; la altura conservada sobrepasa, en ocasiones, los 2 metros. La anchura del muro circundante llega a los 4,30 metros. A juzgar por un fuerte similar, sito en el oasis de Kharga, también en el desierto libio, y del que se conserva hasta el camino de ronda, el recinto que hemos excavado debió de elevarse hasta los 15 metros de altura.

Este vasto monumento se compone únicamente de adobes, ladrillos sin cocer; los constructores les daban forma y los dejaban secar al sol por centenares de miles. A intervalos regulares se observan, en el interior del muro del recinto, las marcas horizontales de troncos, seguramente de palmera, que servían para hacer más sólida la construcción. Los monumentos de adobes son especialmente sensibles a diversos factores de destrucción, sobre todo a la erosión eólica y a la acción de la lluvia, rara pero no excepcional en el desierto. Durante la larga historia del fuerte sus ocupantes llevaron a cabo distintas labores de reconstrucción.

El estudio de la cerámica es un método de datación importante; nos ayuda a precisar la época en que se formaron las capas, por haber terraplenado o por la acumulación de tierra y escombros, o cuándo se levantaron las estructuras “positivas”, una pared, digamos, o se excavaron las “negativas”, como una fosa. Para alcanzar este objetivo se lleva un registro sistemático de todos los objetos procedentes de cada unidad (los fragmentos de cerámica y las monedas). En cualquier caso, cuando la ocupación de un yacimiento se ha prolongado, sus habitantes alteran muchas veces los niveles más antiguos, con la consiguiente complicación para la interpretación arqueológica.



F. LABRIQUE



F. LABRIQUE



F. CHARLIER



F. COLIN

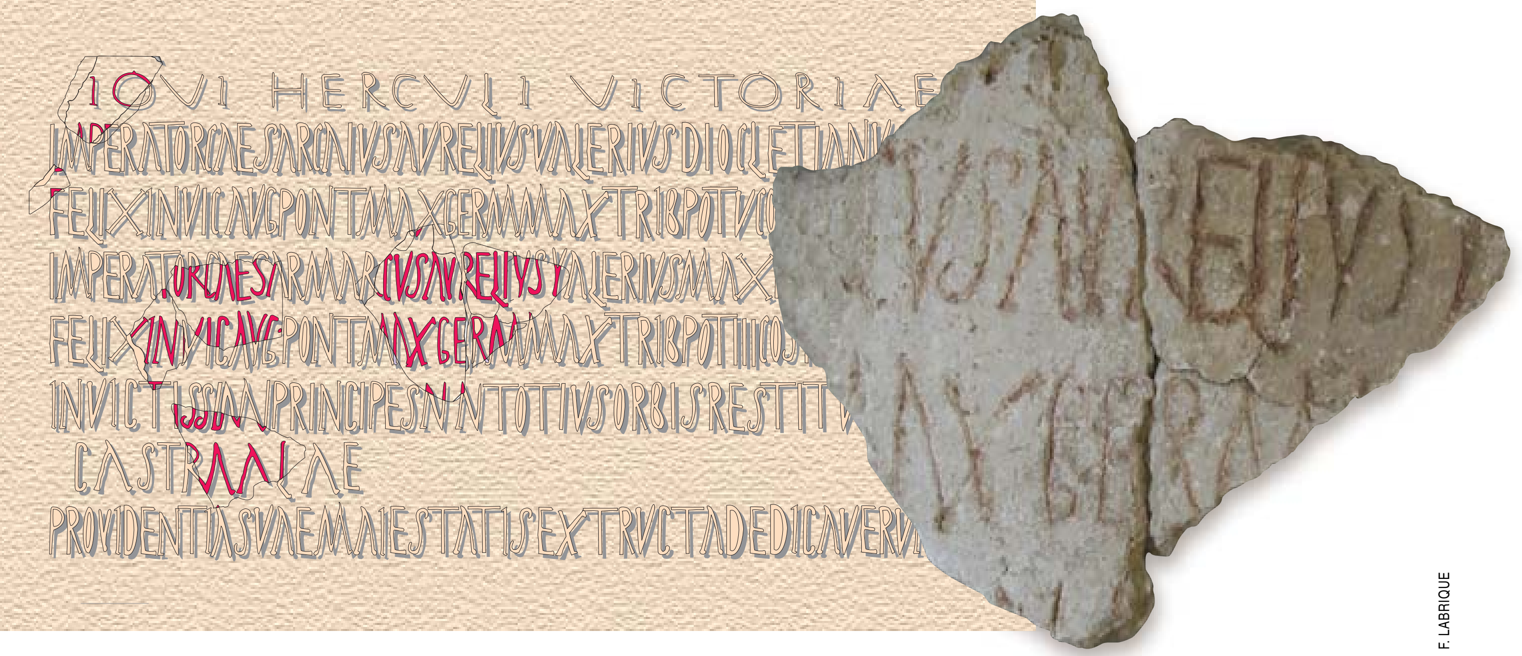
verde en forma de ojo. Entre las ruinas del fuerte romano han aparecido una moneda con la efigie de Maximiano (*c*), acuñada en el segundo año de su reinado (286 o 287 de nuestra era), y un fragmento de loza en forma de Venus. De época bizantina tenemos piezas de vajilla y recipientes de arcilla (*d*). Ya en época árabe, el recinto del fuerte se desmanteló en su práctica totalidad. Los restos del lienzo sur del recinto sirvieron entonces como cementerio; se levantaban hiladas de ladrillos para abrir una fosa alargada en la que el cuerpo se depositaba desnudo y recostado sobre un lado.

Fragmentos cerámicos con inscripciones

En Qaret el-Toub sólo hemos encontrado una capa contemporánea de la fundación del fuerte; abundan, por contra, los restos de las ocupaciones más tardías, entre los siglos V y VI. En esa época se llevaron a cabo importantes trabajos de acondicionamiento en el fuerte: se hizo un vaciado en el interior de uno de los lienzos del muro para levantar una vivienda. En los cimientos de este espacio hemos encontrado un tesoro en monedas, 130, de bronce y vellón (aleación de cobre y plata pobre en este último elemento). La costumbre de enterrar algunas monedas en la cimentación de un edificio es común a diversos períodos de la historia. En este caso, las monedas presentaban una fuerte corrosión y eran ilegibles. Ya hemos podido restaurar seis de ellas; fueron acuñadas entre el 335 y el 408, en las cecas de Alejandría, Constantinopla y Nicomedia.

En la parte occidental del fuerte, una cata ha revelado la presencia de los *principia*, los edificios administrativos y de representación imperial principales; más bien tardíos, no parece que se construyesen al mismo tiempo que los muros del recinto. En los niveles contemporáneos de la última ocupación hemos encontrado 37 *ostraca* griegos y coptos. Estos fragmentos de cerámica se usaban para escribir sobre ellos ya que, al contrario que los papiros, no costaban nada. Nos indican que en los siglos V o VI de nuestra era algunos de los moradores del fuerte conocían las dos lenguas, la del poder y la administración (el griego) y la de la población egipcia (el copto). Los nombres propios de los personajes mencionados en estos textos, José, Johannes, Isak, Israel, Minas, nos hablan de un medio cristianizado.

La destrucción del fuerte empezó en época bizantina; hacia los albores de la era musulmana, a mediados del siglo VII, nuevos ocupantes se asentaron sobre los escombros. Algunos aún eran cristianos: en estos niveles hemos encontrado un pequeño colgante de marfil en forma de cruz. Podemos pensar que hubo una frecuentación regular del lugar hasta el siglo X, a juzgar por las cerámicas más recientes que hemos recogido en el nivel superficial. Cuando se abandonó el lugar, lo que quedaba en pie de los muros del recinto sirvió como nuevo cementerio; los muertos se enterraban en fosas que se abrían levantando hiladas de adobes. Como el lugar era por entonces un descampado, un poco más alto que los alrededores, del que sobresalían los muros de adobe medio derruidos, los lugareños lo bautizaron



4. DE LA DEDICACION FUNDACIONAL DEL FUERTE de Bahariya no quedaban más que algunos fragmentos (*el de la derecha y letras en rojo sobre el texto reconstruido*) de una inscripción latina a nombre de Marcus Aurelius que aparecieron enterrados en el sector de la puerta del fuerte. Ciertos fragmentos de inscripciones de las dedicaciones fundacionales de otros dos fuertes romanos, uno en el Egipto Medio y el otro cerca del canal de Suez, nos han permitido reconstruir la inscripción: el fuerte del oasis de Bahariya fue consagrado el año 288 por los emperadores Diocleciano y Maximiano a "Júpiter, Hércules y la Victoria".

con el nombre de Qaret el-Toub, *el montículo de los ladrillos* en árabe.

Pese a la gran cantidad de información que nos ofrecían los datos estratigráficos de la excavación, seguía quedando en la sombra una cuestión esencial: sabíamos la fecha final de la ocupación del fuerte, pero ignorábamos la de su inicio. En 2000 realizamos un sondeo en el sector de la puerta del fuerte; entre otros hallazgos, esperábamos dar con la dedicación fundacional del monumento, que acostumbraba a exponerse cerca de la entrada. Encontramos cinco pequeños fragmentos de una inscripción latina con el nombre de un emperador Marcus Aurelius, pero su titulatura (el conjunto de sus nombres y títulos) había desaparecido en parte. Los nombres Marcus y Aurelius entran en la titulatura de ocho de los emperadores que reinaron entre la segunda mitad del siglo II y los inicios del IV de nuestra era. ¿Cuál de ellos fue el que ordenó la construcción del fuerte de Qaret el-Toub?

Tras los pasos del fundador del fuerte romano

El padre Claude Sicard, superior de la misión jesuita en Egipto, vivió allí de 1712 a 1726, año en que falleció a causa de la peste. Sus funciones religiosas le llevaron muy a menudo a las zonas rurales, por lo que se le considera el primer europeo que exploró Egipto. Erudito y no sólo descubridor, aprovechaba sus viajes por el valle para estudiar los antiguos monumentos, que describía en sus catálogos. En una visita que realizó en 1716 a una iglesia de Deir al-Gabrawi, en el Egipto medio, copió una inscripción latina grabada sobre una placa de piedra negra que había sido reutilizada como material de construcción en una pared.

Esta placa ha desaparecido, pero gracias a la copia de Sicard conocemos el texto. Se trata de la consagración de un fuerte "a Júpiter, a Hércules y a la Victoria" personificada, en el 288 de nuestra era, por el Colegio Imperial que formaban Diocleciano y Maximiano. La construcción de esa obra defensiva iba destinada a una unidad del ejército romano, la "primera cohorte augusta pretoriana de los Lusitanos" (pueblo que habitaba el Portugal actual). Conforme a lo que se conocía en aquel entonces, Sicard propuso una graciosa interpretación del texto: "La nación portuguesa nutría en aquella época la primera compañía de guardias personales de los emperadores romanos, del mismo modo que ahora podemos ver los guardias escoceses en Francia, los valones en España, los holandeses en Inglaterra, antes los corsos en Roma, los suizos en todas partes...".

Hoy sabemos que el nombre de las unidades auxiliares del ejército romano incluía a menudo una mención geográfica o étnica que recordaba la región del reclutamiento original; pero los sucesivos reclutamientos podían hacerse en otras regiones del Imperio sin que la unidad cambiase de nombre. Además, es evidente que la cohorte pretoriana acampada cerca de Deir al-Gabrawi no tenía la función de proteger al emperador, sino la de controlar el territorio donde se encontraba el campamento base fortificado. Del fuerte sólo pudo identificarse, en 1991, una calzada central bordeada de columnas.

Un arqueólogo británico descubrió una segunda pieza del rompecabezas en 1886, en el yacimiento de Tell Abu Seifi, no lejos del canal de Suez, que acababa de construirse: ocho fragmentos en caliza de una inscripción latina se habían reutilizado en un pavimento cerca de un pozo. Juntando los trozos, salía un texto casi idéntico al que Sicard había descubierto hacía más de 150 años, si bien el nombre de la unidad para la

El autor

FREDERIC COLIN es arqueólogo del Laboratorio de Estudios de las Civilizaciones de la Antigüedad de la Prehistoria a Bizancio, del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS) francés, en la Universidad Marc Bloch de Estrasburgo. Dirige la misión de Bahariya del Instituto Francés de Arqueología Oriental de El Cairo. Trabaja con Françoise Labrique, egiptóloga del Instituto de Ciencias y Técnicas de la Antigüedad del CNRS en la Universidad del Franco Condado, en Besançon.

que se había levantado el fuerte no era el mismo.

Por fin, en 2001 descubrimos en Qaret el-Toub cuatro nuevos fragmentos con inscripciones; junto a los que habíamos encontrado el año precedente, constituían la tercera etapa de este acertijo secular que repartía las pistas por los yacimientos egipcios y las instituciones romanas. Los trozos que teníamos no eran más que una pequeña parte de la inscripción completa; sólo era legible el 13 % de las letras que debió de tener. Pese a todo, el estudio minucioso de las secuencias conservadas, del tamaño y la concentración de las letras en cada línea nos ha permitido reconstruir la estructura y la ejecución del texto, así como identificar a Diocleciano y Maximiano como los autores de la dedicación; también hemos podido comprobar que este texto era un tercer ejemplar, idéntico a las dos inscripciones fundacionales ya descubiertas. La comparación de estos tres documentos, encontrados en yacimientos muy alejados entre sí, nos aclara lo que pasaba el año 288 en las zonas rurales egipcias.

El emperador Diocleciano, reinante desde el 284, decide emprender, poco después de su ascenso al poder, un vasto programa de construcciones militares en Egipto. Piensa que de esta forma protegerá la sede principal de las unidades repartidas por el país y controlará el territorio. El Imperio había sufrido numerosas amenazas de los bárbaros durante la segunda mitad del siglo III y, en lo que tocaba al desierto de Libia, diversos ataques de los libios entre el 258 y el 270. También hay constancia en otras regiones del Imperio de esta política sistemática de construcciones impulsada por Diocleciano; se cuenta con los testimonios de diversos autores romanos y bizantinos. Por ejemplo, tenemos tres dedicaciones fundacionales de fuertes, idénticas entre sí, en Bulgaria, en sendos yacimientos a las orillas del Danubio; una vez más las distintas construcciones se inauguraron al mismo tiempo, en el 298 o 299. Podemos deducir de todo ello que, cuando finalizaban los trabajos, la cancillería imperial enviaba a los responsables locales una circular estereotipada con el texto que había que situar en lugar visible para la consagración oficial de cada monumento; sólo faltaba poner el nombre de la unidad militar de que se tratase.

Volviendo a Diocleciano, asocia a Maximiano a su reinado a partir del 286. Desde el 287, ambos emperadores fueron considerados en la propaganda oficial, respectivamente, como los descendientes terrestres de los dioses Júpiter y Hércules. En Roma, dos alas restauradas del pórtico de Pompeyo recibirán los nombres de *Iovia* y *Herculea*, en honor a los dos dioses. En aquel mundo romano, donde las formas de expresión oficiales del poder estaban uniformizadas desde hacía tiempo, ni las regiones más alejadas escapaban de la propaganda imperial cuando el Estado construía.

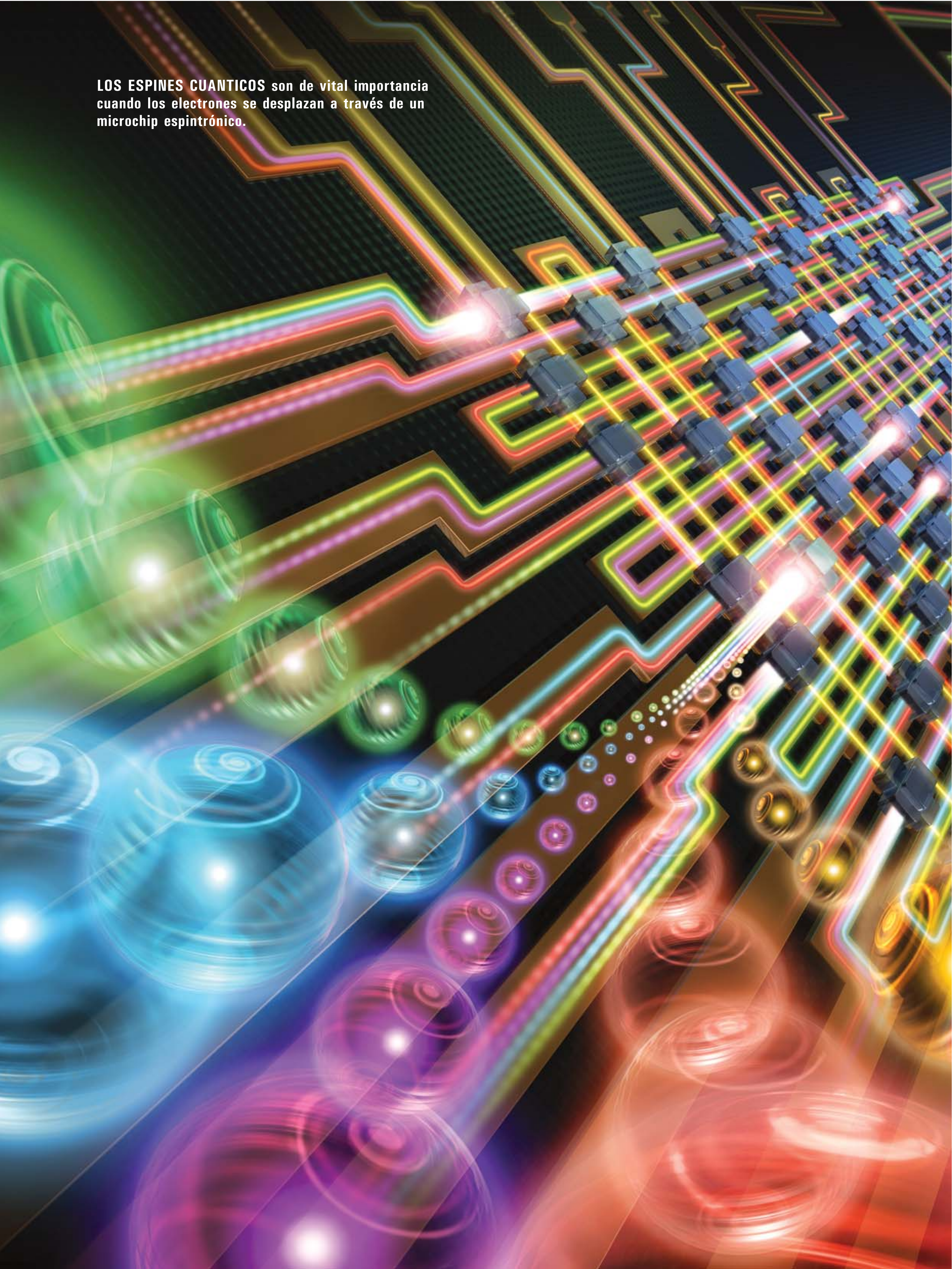
Bibliografía complementaria

BAHRIA OASIS, I-II. A. Fakhry. The Egyptian Deserts, Government P.; El Cairo 1942-1950.

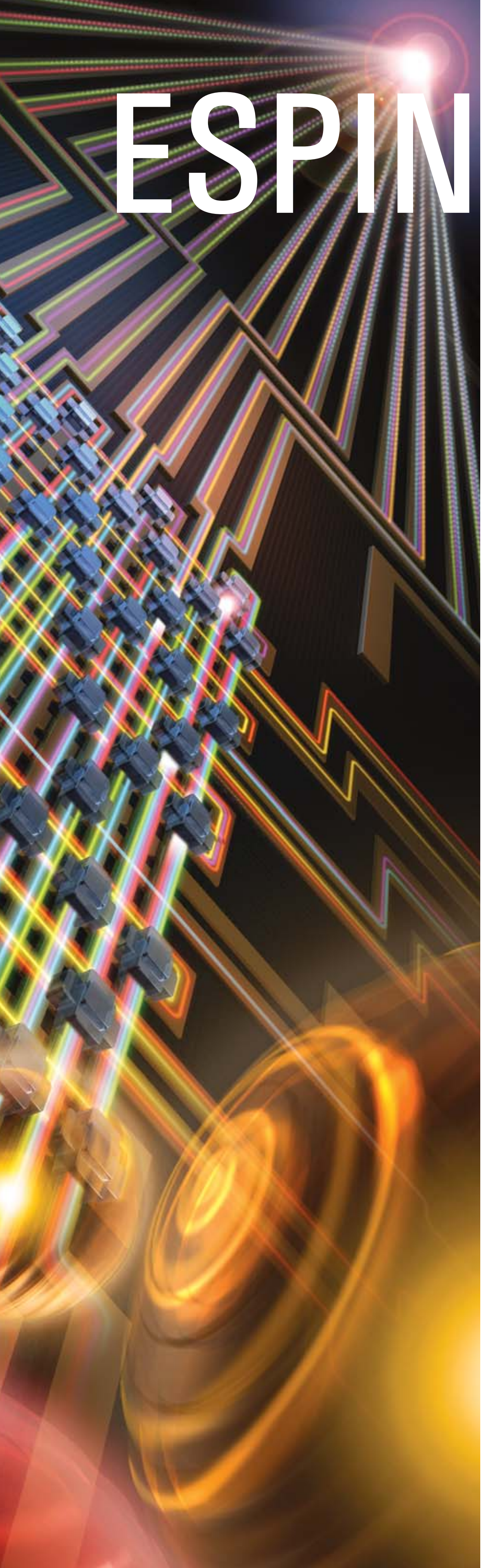
OEUVRES, I, LETTRES ET RELATIONS INÉDITES. Cl. Sicard. Presentación y notas de M. Martin. Bibliothèque d'Étude 83-85; El Cairo, 1982.

LES OASIS D'ÉGYPTE À L'ÉPOQUE GRECQUE, ROMAINE ET BYZANTINE D'APRÈS LES DOCUMENTS GRECS. Bibliothèque d'Étude 100; El Cairo, 1987.

QARET EL-TOUB: UN FORT ROMAIN ET UNE NÉCROPOLE PHARAONIQUE. PROSPECTION ARCHÉOLOGIQUE DANS L'OASIS DE BAHARIYA 1999. Fr. Colin, D. Laisney y S. Marchand, en *Bulletin de l'Institut Française d'Archéologie Orientale*, vol. 100, páginas 145-192; 2000.



LOS ESPINES CUANTICOS son de vital importancia cuando los electrones se desplazan a través de un microchip espintrónico.



ESPINTRONICA

Los dispositivos microelectrónicos que se basan en el espín del electrón facturan ya miles de millones de euros; más adelante, quizá nos traigan los microchips cuánticos

David D. Awschalom, Michael E. Flatté y Nitin Samarth

A medida que el rápido progreso en la miniaturización de los dispositivos electrónicos semiconductores se acerca a un tamaño de los elementos grabados en los chips inferior a cien nanómetros, más ominosa resulta la proximidad cada vez mayor del régimen cuántico. Los pragmáticos intentan escapar de él mediante un diseño ingenioso de los chips semiconductores que no abandona el contexto de la electrónica "clásica" [*véase* "Microchips en vertical", por Thomas H. Lee, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2002]. Algunos, en cambio, creemos que se nos ofrece una oportunidad sin precedentes de definir una clase radicalmente nueva de dispositivos que sacaría partido de las peculiaridades del mundo cuántico.

Una de ellas es el espín, propiedad del electrón ligada al magnetismo. Los dispositivos que se basan en él constituyen la espintrónica (nombre abreviado de "electrónica basada en el espín"), o magnetoelectrónica. Las técnicas de la información han recurrido hasta ahora a dispositivos que desplazan cargas eléctricas y hacen caso omiso del espín que todo electrón lleva consigo.

No obstante, el magnetismo (y en consecuencia el espín del electrón) siempre ha tenido una gran importancia en el almacenamiento de información. Hasta los primeros discos duros usaban ya la magnetorresistencia —un cambio en la resistencia eléctrica causado por un campo magnético— para leer los datos almacenados en dominios magnéticos. No sorprende, pues, que la espintrónica haya logrado sus primeros éxitos en el almacenamiento de datos. La mayoría de los ordenadores portátiles van hoy provistos de discos duros que guardan una cantidad de datos formidable por milímetro cuadrado. Leen tal densidad de información gracias a un efecto espintrónico, la gigamagnetorresistencia (GMR).

Técnicas espintrónicas de almacenamiento más complejas están ya en una etapa avanzada de elaboración: en los próxi-

SLIM FILMS

mos años se lanzará al mercado la MRAM (memoria magnética de acceso aleatorio), un nuevo tipo de memoria no volátil de ordenador. Las MRAM mantendrán su estado incluso con el ordenador apagado, pero a diferencia de las actuales formas de memoria no volátil, tendrán velocidades de conmutación y capacidad de reescritura que desafiarán a las de las RAM ordinarias.

En las actuales cabezas de lectura y MRAM, la primera, y más madura, de las tres clases de espintrónica, los elementos fundamentales están hechos de aleaciones ferromagnéticas metálicas. En la segunda clase, las corrientes con espín polarizado circulan por semiconductores en vez de por metales. Si se lograse una espintrónica útil con semiconductores, podría aprovechar la variedad de técnicas microelectrónicas ya existentes; surgirían muchos más tipos de dispositivos, que la elevada calidad de las propiedades ópticas de los semiconductores y su capacidad para amplificar tanto las señales ópticas como las eléctricas posibilitan. Como ejemplos cabe citar los conmutadores ultrarrápidos y los microprocesadores totalmente programables y completamente espintrónicos. Esta vía de investigación nos llevaría quizás a una nueva clase de electrónica multifuncional que combinaría lógica, almacenamiento y comunicaciones en un solo chip.

Hay que responder varias preguntas importantes antes de que la segunda clase de dispositivos dé lugar a una industria viable: ¿podemos inventar maneras económicas de combinar metales ferromagnéticos y semiconductores en circuitos integrados? ¿Y fabricar semiconductores que sean ferromagnéticos a temperatura ambiente? ¿Qué manera eficiente hay de inyectar corrientes con espín polarizado —"corrientes de espín"— en un semiconductor? ¿Qué les sucede a las corrientes de espín en las fronteras entre semiconductores diferentes? ¿Cuánto tiempo puede una corriente de espín retener su polarización en un semiconductor?

Nuestros propios grupos de investigación trabajan en estas cuestiones, pero no pierden tampoco de vista la más lejana, e incierta, cantera de la tercera categoría de dispositivos: los que manipularían los estados cuánticos de espín de los electrones individuales. Esta categoría incluye las puertas lógicas cuánticas espintrónicas que permitirían la construcción de ordenadores cuánticos a gran escala, unos ordenadores que superarían inmensamente a los corrientes en determinadas tareas. Para llegar a esta meta se recurre a un surtido de singulares técnicas: los iones en trampas magnéticas, la luz "inmovilizada", los gases cuánticos ultrafríos que reciben el nombre de condensados de Bose-Einstein y la resonancia magnética nuclear de moléculas en líquidos. Hay muchos caminos hacia la Roma cuántica.

A nosotros nos parece que es mejor construir sobre los amplios cimientos que ofrecen las técnicas ordinarias de la electrónica de semiconductores. Una reciente serie de descubrimientos inesperados parece dar la razón a nuestro presentimiento de que la espintrónica de semiconductores proporciona una vía factible hacia los ordenadores cuánticos y otras máquinas informáticas cuánticas. Tanto si se piensa, a corto plazo, en la futura electrónica de consumo, como, a largo, en la más lejana perspectiva de la computación cuántica, la espintrónica promete ser revolucionaria.

Las corrientes de espín

Espín es la castellanización de una palabra del inglés, *spin*, que significa rotación; la denominación expresa una manera intuitiva de entender esta propiedad. Imaginemos una pequeña esfera eléctricamente cargada que rota con rapidez. Las cargas que circulan en la esfera vienen a ser diminutos anillos de corriente eléctrica, que crean un campo magnético similar al campo magnético terrestre. La rotación se simboliza con un vector, o flecha, que

FUNDAMENTOS DEL ESPIN

Además de su masa y carga eléctrica, los electrones tienen una cantidad intrínseca de momento angular, el espín, casi como si fuesen unas canicas que rotan.

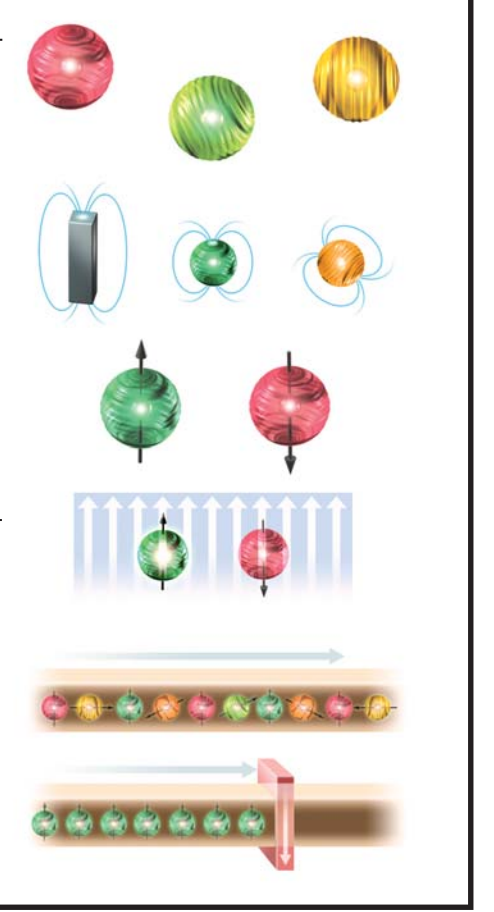
El espín lleva asociado un campo magnético, como el de una diminuta barra imantada que estuviese alineada con su eje.

El espín se representa con un vector. Para una esfera que gire de "oeste a este" el vector apuntará hacia el "norte", o "hacia arriba" ("hacia abajo" en caso contrario)

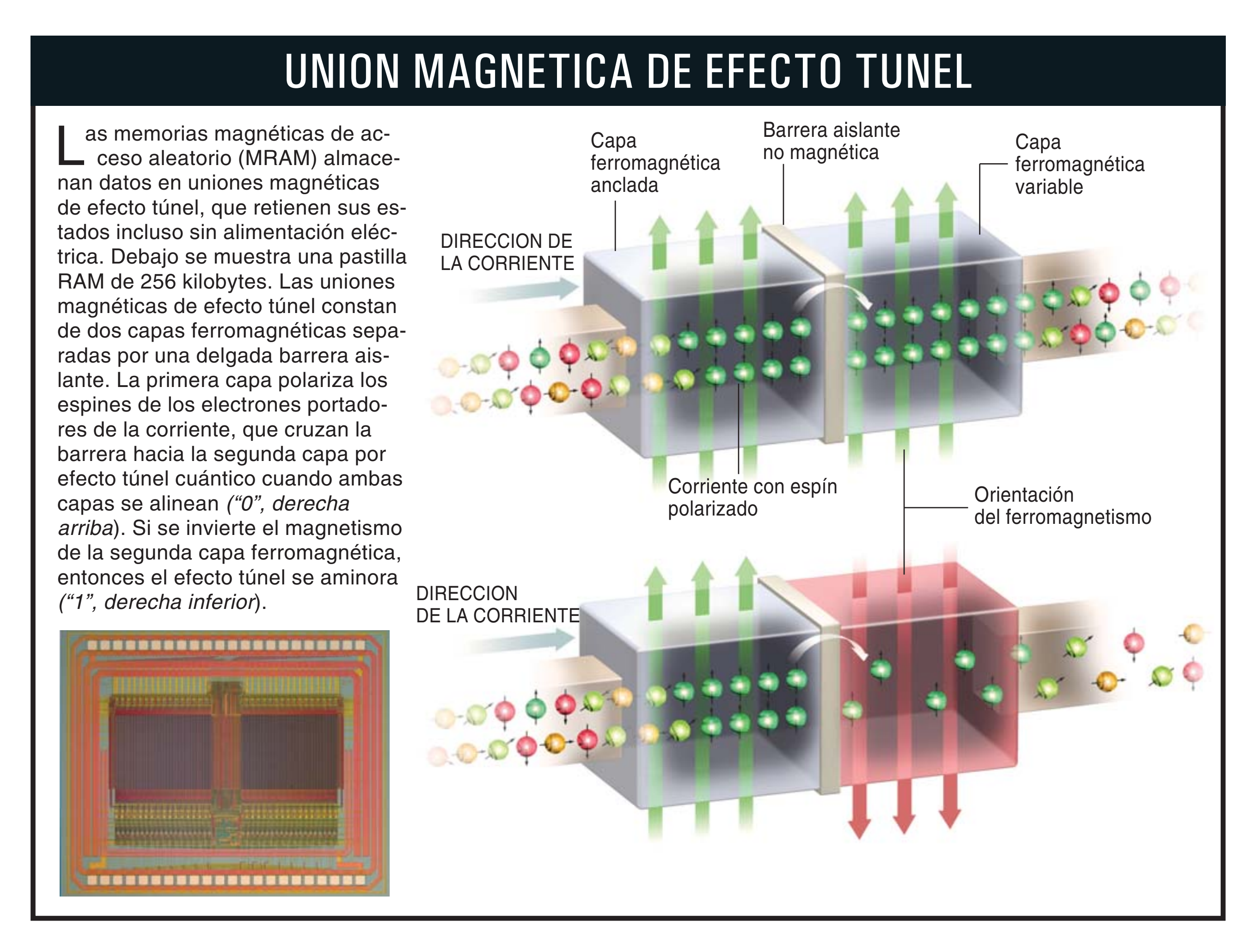
En un campo magnético, los electrones con espín "hacia arriba" y espín "hacia abajo" tienen energía distinta.

En un circuito eléctrico ordinario los espines están orientados aleatoriamente y no influyen en la corriente.

Los dispositivos espintrónicos crean corrientes de espín polarizado y usan éste para controlar el flujo de la corriente.



SLIM FILMS



UNION MAGNETICA DE EFECTO TUNEL

Las memorias magnéticas de acceso aleatorio (MRAM) almacenan datos en uniones magnéticas de efecto túnel, que retienen sus estados incluso sin alimentación eléctrica. Debajo se muestra una pastilla RAM de 256 kilobytes. Las uniones magnéticas de efecto túnel constan de dos capas ferromagnéticas separadas por una delgada barrera aislante. La primera capa polariza los espines de los electrones portadores de la corriente, que cruzan la barrera hacia la segunda capa por efecto túnel cuántico cuando ambas capas se alinean *(“0”, derecha arriba)*. Si se invierte el magnetismo de la segunda capa ferromagnética, entonces el efecto túnel se aminora *(“1”, derecha inferior)*.

apunta a lo largo del eje de rotación de la esfera. Si se sumerge la esfera en rotación en un campo magnético externo, su energía total cambiará dependiendo de la dirección relativa de su vector de rotación con respecto al campo (*véase el recuadro* “Fundamentos del espín”).

Hasta cierto punto, un electrón es como esa esfera cargada que rota: tiene una cantidad de momento angular (su “espín”) y un magnetismo asociado; rodeado por un campo magnético externo, su energía dependerá de cómo tenga orientado el vector de espín. Pero ahí acaban las similitudes y comienzan las peculiaridades cuánticas. Los electrones no son pequeñas esferas, sino, parece, puntos ideales, sin dimensiones; no vale, pues, la sencilla imagen que equipara el espín a una rotación real. Además, cada electrón tiene exactamente la misma cantidad de espín, la mitad de la unidad fundamental cuántica de momento angular. Esa propiedad está fundamentada en las matemáticas que describen las partículas elementales de la materia. El espín, como la masa y la carga, es una de las características que definen a un electrón.

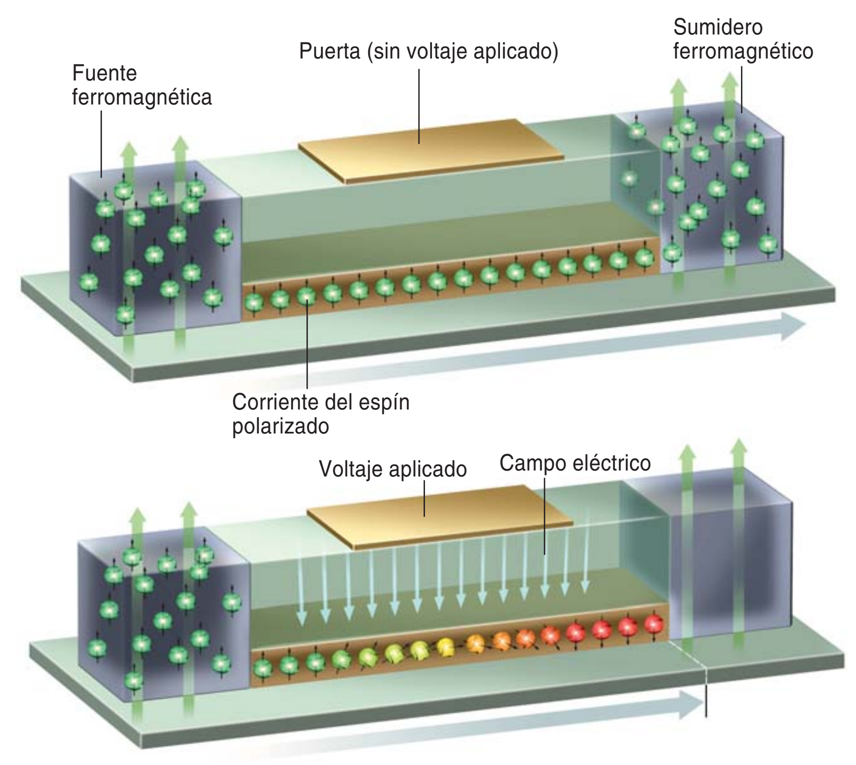
En una corriente eléctrica ordinaria los espines se orientan al azar y no desempeñan ninguna función en la determinación de la resistencia del hilo o de la amplificación de un circuito de transistores. Los dispositivos espintrónicos, por el contrario, se basan en las diferencias entre el transporte de los electrones con el espín hacia “arriba” y los electrones con el espín hacia “abajo”. En un material ferromagnético, el hierro o el cobalto por ejemplo, los espines de determinados electrones de los átomos vecinos tienden a alinearse. En un trozo de hierro muy magnetizado ese alineamiento se extiende a lo largo de la mayor parte del metal. Cuando una corriente atraviesa el material ferromagnético tiende a suprimirse el paso de los electrones cuyo espín apunte en uno de los dos sentidos, ”arriba” o “abajo”. El resultado será una corriente con el espín polarizado, en la que todos los espines de los electrones apuntarán en el sentido no suprimido.

Un material ferromagnético puede afectar incluso al flujo de la corriente en un metal no magnético cercano. Así, las cabezas de lectura de los actuales discos duros de ordenador llevan una “válvula de espín”, en la que una capa de un metal no magnético va emparedada entre dos capas metálicas ferromagnéticas. La magnetización de la primera capa ferromagnética está fijada, o “anclada”, al contrario que la de la segunda. Cuando la cabeza de lectura se desplaza a lo largo de una pista de datos de un disco de ordenador, los pequeños campos magnéticos de los unos y ceros grabados bastan para ir cambiando la magnetización de la segunda capa en un sentido y en el otro, paralela o antiparalelamente a la magnetización de la capa anclada. En el primero de estos dos casos, el cambio en paralelo, sólo los electrones orientados en la di-

MOTOROLA (*chip*); SLIM FILMS

UN POSIBLE TRANSISTOR DE ESPIN

Uno de los diseños que se han propuesto de un TEC (transistor de efecto campo) espintrónico consta de una fuente y un sumidero, separados, al igual que en un TEC corriente, por un estrecho canal semiconductor. En el TEC espintrónico, fuente y sumidero son ferromagnéticos. La fuente envía electrones con el espín polarizado hacia el canal; esta corriente con espín circula fácilmente si alcanza el sumidero sin haber sufrido cambios (*arriba*). Un voltaje aplicado al electrodo de la puerta produce un campo eléctrico en el canal, y éste imparte a los espines de los electrones que se desplazan rápidamente un movimiento de precesión, una rotación (*abajo*). El sumidero bloquea la corriente de espín según cuánto hayan girado los espines. Cambiar los espines de esta forma consume mucha menos energía y es mucho más rápido que el funcionamiento de un FET ordinario, donde se expulsan las cargas del canal con un campo eléctrico mayor.



SLIM FILMS

rección escogida circularán con facilidad por el conductor; en el segundo, el cambio antiparalelo, se impedirá el paso de todos los electrones. Las consiguientes modificaciones de la corriente permiten a las cabezas de lectura GMR detectar campos más débiles que los captados por sus predecesoras. De esta forma, los datos se almacenan mediante puntos magnetizados empaquetados más densamente en el disco; la densidad de almacenamiento se triplica.

Otro dispositivo con tres capas, la unión magnética de efecto túnel, posee una delgada capa aislante entre dos materiales ferromagnéticos metálicos (*véase el recuadro* "Unión magnética de efecto túnel"). La corriente circula a través del dispositivo gracias al efecto túnel cuántico: un pequeño número de electrones consiguen saltar la barrera pese a que no les está permitido hallarse en el aislante. La corriente de túnel se bloquea cuando las dos capas ferromagnéticas tienen direcciones opuestas y fluye cuando sus orientaciones son iguales.

Las uniones magnéticas de efecto túnel forman la base de las pastillas MRAM mencionadas antes. Cada unión almacena un bit de datos en la orientación de su capa ferromagnética no anclada, que retendrá su estado magnético con independencia de que haya alimentación eléctrica o no, al menos mientras no se la reescriba de nuevo deliberadamente.

Estos dispositivos metálicos espintrónicos facilitan nuevas formas de almacenar información, pero la espintrónica de semiconductores ofrece posibilidades aún más interesantes. Puesto que los semiconductores ordinarios no son ferromagnéticos, cabe preguntarse cómo es posible que pueda haber un dispositivo semiconductor espintrónico. Un método consiste en inyectar una corriente de espín polarizado en el semiconductor por medio de un metal ferromagnético.

En 1990 Supriyo Datta y Biswajit A. Das, entonces en la Universidad Purdue, propusieron un diseño de transistor de efecto campo de espín polarizado, o TEC de espín (*véase el recuadro* "Un posible transistor de espín"). Un TEC ordinario tiende un estrecho canal semiconductor entre dos electrodos: la fuente y el sumidero. Cuando se aplica voltaje al electrodo de puerta, que está encima del canal, el campo eléctrico resultante expulsa los electrones del canal (por ejemplo), que se convierte en un aislante. El TEC de espín de Datta-Das tiene una fuente y un sumidero ferromagnéticos, así que la corriente que circula por el canal presenta espín polarizado. Cuando se aplica un voltaje a la puerta, cambian los espines en el canal; el sumidero rechaza estos electrones de alineación opuesta.

Un TEC de espín tendría varias ventajas sobre un TEC ordinario. Cambiar el espín de un electrón consume mucha menos energía y se hace con mayor rapidez que expulsar un electrón del canal. También es imaginable el cambio de orientación de la fuente o el sumidero por medio de un campo magnético; así se añadiría un tipo de control que no es posible en un TEC ordinario: unas puertas lógicas cuyas funciones puedan cambiarse sobre la marcha.

Los autores

DAVID D. AWSCHALOM, MICHAEL E. FLATTÉ y NITIN SAMARTH empezaron a trabajar en equipo durante la reciente estancia sabática de Flatté en la Universidad de California en Santa Bárbara (UCSB). Awschalom y Samarth llevaban ya colaborando en el estudio experimental de la espintrónica de semiconductores durante más de una década. Awschalom es catedrático de física y director del Centro de Espintrónica y Computación Cuántica de la UCSB. Samarth es catedrático de física de la Universidad Estatal de Pennsylvania. Flatté trabaja sobre la teoría de materia condensada y es profesor asociado de la Universidad de Iowa.

No se ha logrado todavía fabricar un prototipo operativo del TEC de espín de Datta-Das debido a las dificultades que lleva consigo la inyección eficiente de corrientes de espín por un metal ferromagnético en un semiconductor. Sigue siendo un punto sujeto a debate, pero recientes experimentos ópticos efectuados en laboratorios de diversas partes del mundo indican que se puede lograr la inyección eficiente de espín en los semiconductores con unos materiales no ordinarios, los semiconductores magnéticos, que incorporan magnetismo porque los cristales semiconductores están dopados con átomos, por ejemplo, de manganeso.

Algunos semiconductores magnéticos están concebidos para que presenten ferromagnetismo; proporcionan un componente espintrónico, un elemento ferromagnético con función de puerta, que podría revestir interés en los transistores de espín. Un pequeño voltaje haría de conmutador entre los estados no magnéticos y ferromagnéticos del semiconductor. A la vez, un elemento ferromagnético con función de puerta valdría también como filtro de espín: un dispositivo que, activado, dejaría pasar un estado de espín y bloquearía el otro.

El efecto de filtrado se amplificaría colocando el elemento ferromagnético en un diodo túnel resonante. Los diodos túnel resonantes ordinarios permiten el flujo de corriente para un voltaje específico en el que la energía de los electrones es resonante con la barrera del efecto túnel. La versión que lleva un elemento ferromagnético tendría una barrera con diferentes voltajes de resonancia para el espín arriba y el espín abajo.

Los desarrollos más apasionantes de la espintrónica de semiconductores serán probablemente dispositivos que aún no se han ni imaginado. Un problema crucial para esta segunda clase de espintrónica, hay que investigarlo, es hasta qué punto conservan los electrones un estado concreto de espín mientras atraviesan un semiconductor o pasan de un material a otro. Por ejemplo, un TEC de espín no funcionará a no ser que los electrones permanezcan polarizados tras entrar en el canal y hasta alcanzar el otro extremo.

El problema de cuál es la velocidad a que se va extinguiendo la polarización del espín adquiere la mayor importancia cuando se trata de construir un ordenador cuántico basado en los espines de los electrones. Para conseguirlo hay que controlar una propiedad conocida como "coherencia cuántica", en esencia la pura naturaleza cuántica de todos los componentes del ordenador portadores de datos. En los semiconductores, los datos cuánticos basados en las cargas de los electrones tienden a perder coherencia, a disiparse, en apenas unos picosegundos, incluso a temperaturas criogénicas. Los datos cuánticos basados en el espín deberían de ser, por naturaleza, más robustos. No deja de resultar sintomático que nuestros grupos de investigación diesen con resultados básicos importantes relativos a los espines coherentes de los electrones mientras realizaban experimentos destinados a conseguir semiconductores magnéticos prácticos.

Una agradable sorpresa

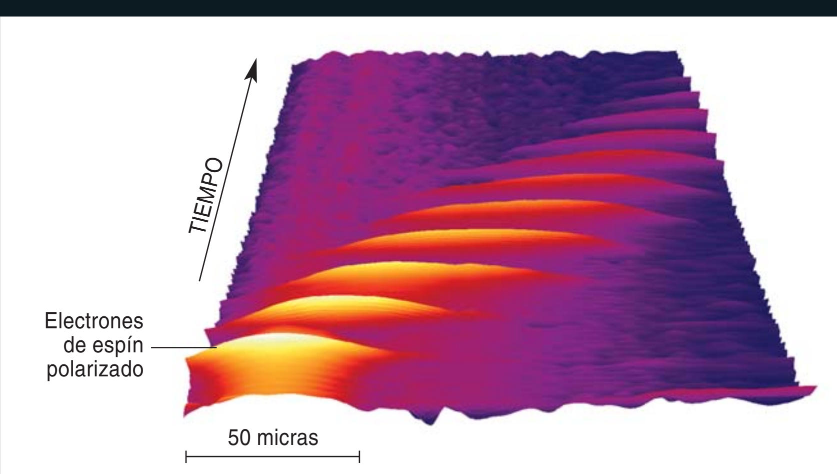
Estábamos experimentando en 1997, en la Universidad de California en Santa Bárbara, con el seleniuro de cinc (ZnSe), un semiconductor ordinario que se viene estudiando desde hace mucho. Se pretendía que hiciera de control en una investigación de los semiconductores magnéticos. Excitamos por medio de impulsos de luz polarizada circularmente conjuntos de electrones del ZnSe para que adquiriesen estados de espín idénticos. En una onda de luz circularmente polarizada los campos eléctrico y magnético, en vez de oscilar en intensidad, giran en un círculo perpendicular a la dirección de la luz.

Enviamos los impulsos ultracortos (100 femtosegundos) horizontalmente a través del semiconductor, excitando electrones hacia sus estados de espín horizontal, en un principio alineados con el haz de luz. En un campo magnético vertical los espines de los electrones realizan una precesión; dicho de otro modo, la dirección de cada vector de espín del electrón rota en el plano horizontal. (Se trata de un movimiento similar al que realiza un giróscopo con un eje horizontal de rotación en el campo gravitatorio terrestre.) La precesión nos permite inspeccionar el tiempo durante el cual permanecen coherentes estos estados, pero el estado de espín horizontal goza de otra propiedad más importante.

La rotación horizontal no tiene nada de especial en una pelota. Está diferenciada absolutamente de los dos modos verticales de rotación. En los electrones, sin embargo, los estados cuánticos de espín horizontal son superposiciones coherentes de los estados de espín hacia arriba y hacia abajo: se encuentran en el estado hacia arriba y en el estado hacia abajo al mismo tiempo. Esta es precisamente la clase de superposición coherente de estados en que se basan los ordenadores cuánticos (*véase el recuadro* "Qubits espintrónicos").

Cada espín del electrón puede representar un bit; por ejemplo, un 1 el espín hacia arriba y un 0 el espín hacia abajo. En el caso de los ordenadores corrientes, se ha logrado que los bits permanezcan, en muy alta medida, en estados estables bien definidos. Un ordenador cuántico codifica la información en bits cuánticos, o qubits, cada uno de los cuales puede existir en alguna superposición de 0 y 1. Con su gran número de qubits en su-

ARRASTRE DEL ESPIN EN LOS SEMICONDUCTORES



Un campo eléctrico arrastra a lo largo de más de 100 micras un conjunto de electrones sin que éstos pierdan sus estados de polarización del espín. Constituye un paso fundamental hacia la creación de técnicas basadas en la coherencia cuántica a gran escala. Los picos se reducen al ir perdiéndose la coherencia cuántica de los estados.

perposiciones de estados alternativos, en un ordenador cuántico el paralelismo es, intrínsecamente, masivo: los algoritmos cuánticos pueden trabajar a la vez con muchos números diferentes.

Por desgracia, las interacciones con el entorno, en la mayoría de los sistemas físicos, perturban enseguida esos estados de superposición. Una perturbación habitual cambiaría una superposición de 0 y 1 de manera aleatoria, bien en un cero, bien en un uno, proceso al que se denomina pérdida de la coherencia. Los qubits más recientes basados en la carga de los electrones en un semiconductor permanecen coherentes durante picosegundos, en el mejor de los casos, y sólo a temperaturas demasiado bajas para las aplicaciones prácticas. Ocurre esa rápida pérdida de coherencia porque la fuerza eléctrica entre las cargas es fuerte y de largo alcance. En los dispositivos semiconductores tradicionales, esa interacción intensa constituye una bendición, pues posibilita el delicado control del flujo de corriente con pequeños campos eléctricos. Para los dispositivos cuánticos coherentes, en cambio, resulta letal.

Los qubits de espín electrónico interaccionan sólo débilmente con el entorno; suelen hacerlo por medio de campos magnéticos variables en el tiempo o que no son uniformes en el espacio. Estos campos se pueden apantallar de manera eficaz. Con nuestro experimento nos proponíamos crear algunos de estos estados de espín coherentes en un semiconductor y ver cuánto podían sobrevivir. Los resultados también valían de guía en el diseño de artilugios, de transistores de espín, digamos, que no dependan del mantenimiento y detección de la coherencia cuántica del espín de un solo electrón.

Nuestro experimento midió la velocidad de pérdida de la coherencia siguiendo la precesión de los espines. Cada electrón continuaba con la precesión siempre y cuando su superposición permaneciese coherente. Inspeccionamos la precesión con impulsos débiles de luz; obteníamos así verdaderas imágenes estroboscópicas de la dinámica del espín. Mientras el electrón efectuaba la precesión, la señal medida oscilaba en magnitud; al ir perdiendo coherencia, la amplitud de las oscilaciones disminuía hasta anularse.

Con gran sorpresa nuestra, los estados de espín ópticamente excitados en el ZnSe permanecieron coherentes, a temperaturas bajas y durante varios nanosegundos, mil veces más que los qubits basados en la carga. Los estados sobrevivieron incluso algunos nanosegundos a temperatura ambiente. Estudios posteriores de los electrones en el arseniuro de galio (GaAs, un semiconductor de alta calidad de uso común en aplicaciones cotidianas, como los teléfonos móviles y los reproductores de CD) han mostrado que, en condiciones óptimas, la coherencia de espín en un semiconductor podría durar, a bajas temperaturas, cientos de nanosegundos.

El peligro de los huecos

Estos experimentos descubrieron además algunas características, fundamentales si se quieren tiempos de coherencia de espín largos. La naturaleza de los portadores de espín y carga es de primordial importancia. Un semiconductor tiene dos bandas de estados que los electrones puedan ocupar: una banda de valencia, que por lo normal está llena, y una banda de conducción, a una energía un poco superior, que por lo normal está vacía. Los portadores de carga en los semiconductores son de dos clases: electrones de conducción, que son los electrones de la banda de conducción, y huecos de valencia, que son los electrones que faltan en la banda de valencia. Los huecos llevan espín porque, en una banda de valencia llena, todos los espines se anulan mutuamente: la extracción de un electrón deja un desequilibrio neto de espín igual que deja también una carga neta positiva.

Los huecos tienen tiempos de coherencia de espín muchísimo más cortos que los electrones; el intercambio de espín entre éstos y aquéllos es muy eficiente y acelera la pérdida de coherencia de ambos. Por estas razones, trae cuenta no tener portadores de huecos, condición que se satisface si se utilizan cristales semiconductores de tipo *n*, dopados para que en la banda de conducción haya algunos electrones de más pero sin los correspondientes huecos de valencia.

Cuando se han eliminado los huecos, la fuente predominante de pérdida de coherencia se debe a un efecto relativista: un cuerpo que se mueve a gran velocidad a través de un campo eléctrico lo ve transformado parcialmente en un campo magnético. En el caso del electrón que

SLIM FILMS

se mueve por un semiconductor, el campo eléctrico procede de la estructura cristalina del material. El espín de un electrón que se mueve con rapidez adquirirá un movimiento de precesión alrededor del campo magnético local resultante que ve. En cada uno de nuestros conjuntos, los diez mil millones de electrones excitados divergen en sus velocidades y, por lo tanto, efectúan la precesión de forma diferente. Dos espines electrónicos que empezaron siendo paralelos evolucionan pronto hasta orientarse en direcciones opuestas. Al aumentar esta desalineación entre los electrones, disminuye el promedio de la polarización del espín de la población; nuestro experimento lo mide como pérdida de la coherencia. Este origen poblacional de la pérdida de la coherencia sustenta la esperanza de que los tiempos de coherencia de espín de los electrones individuales pueden resultar muy superiores incluso a los observados en los conjuntos.

Hacia el futuro

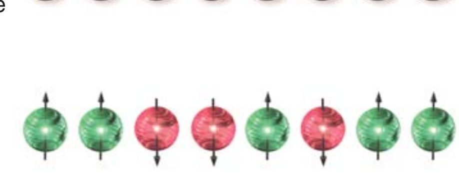
Junto con el tiempo de vida de los portadores, hay otras dos propiedades muy importantes para las aplicaciones de los semiconductores: la longitud recorrida por el transporte de las excitaciones y la rapidez con que puede manipularse el estado de un dispositivo. El transporte macroscópico del espín se llevó por primera vez a cabo en el arseniuro de galio con dopaje *n*. Un impulso de láser excitó un grupo de electrones con movimiento de precesión coherente, de forma similar a como se hacía en los experimentos de tiempo de vida, sólo que en esta ocasión un campo eléctrico lateral arrastraba a los electrones a través del cristal. Los paquetes de espines se desplazaron más de 100 micras (una distancia mucho mayor que el tamaño de los elementos de la microelectrónica contemporánea) con sólo una moderada pérdida de la polarización del espín (*véase el recuadro* "Arrastre del espín en los semiconductores"). En experimentos recientes se ha conseguido impulsar espines coherentes a través de las complejas interfaces que separaban cristales semiconductores de diferente composición (por ejemplo, los han transferido del AsGa al ZnSe). Una gran variedad de aplicaciones de los semiconductores, de los láseres a los transistores, se basan en las heteroestructuras, que combinan materiales diferentes. Cabría aplicar las mismas técnicas de diseño a la espintrónica.

Se han registrado nuevos avances hacia el tratamiento cuántico de la información. En particular, se han girado espines electrónicos coherentes mediante impulsos de láser de 150 femtosegundos; con ello se ha demostrado que se pueden modificar miles de veces estos espines, al menos en principio, antes de que pierdan su coherencia. Mientras tanto, los investigadores con metas más próximas han dado pasos ha-

SLIM FILMS

QUBITS ESPINTRONICOS

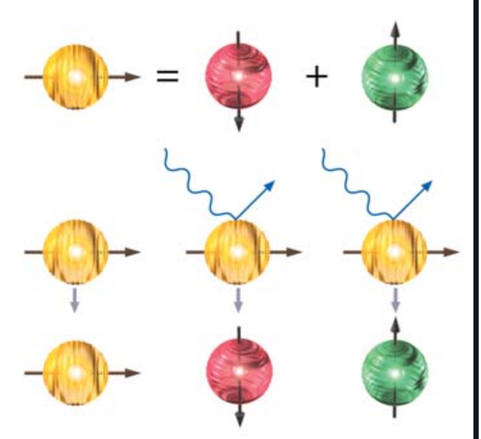
En un ordenador corriente cada bit tiene un valor definido de 0 o 1. Una serie de ocho bits puede representar cualquier número de 0 a 255, pero sólo un número cada vez.



Los espines electrónicos, restringidos a orientarse hacia arriba y hacia abajo, podrían utilizarse como bits.



Los bits cuánticos, o qubits, pueden existir como superposiciones de 0 y 1, ser a la vez ambos números. Ocho qubits pueden representar cada número de 0 a 255, simultáneamente.



Los espines electrónicos son qubits naturales: un electrón con eje horizontal de rotación es una superposición coherente de un espín hacia arriba y un espín hacia abajo; es menos frágil que otros estados electrónicos cuánticos.

Los qubits se caracterizan por su extrema fragilidad: interacciones perdidas con su entorno degradan las superposiciones con suma rapidez y por lo normal las convierten en bits aleatorios ordinarios.

Bibliografía complementaria

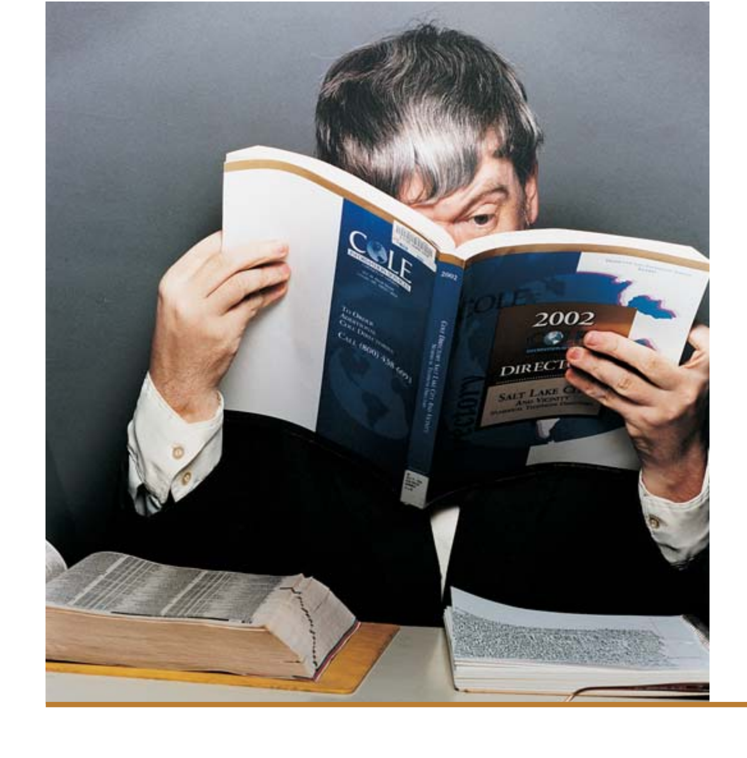
MEET THE SPIN DOCTORS. P. Ball en *Nature*, vol. 404, págs. 918-920; 27 de abril, 2000.

ULTRAFAST MANIPULATION OF ELECTRON SPIN COHERENCE. J. A. Gupta, R. Knobel, N. Samarth y D. D. Awschalom en *Science*, vol. 292, págs. 2458-2461; 29 de junio, 2001.

SPINTRONICS: A SPIN-BASED ELECTRONICS VISION FOR THE FUTURE. S. A. Wolf *et al*. en *Science*, vol. 294, págs. 1488-1495; 16 de noviembre, 2001.

MICROCHIPS THAT NEVER FORGET. A. Cho en *Science*, vol. 296, págs. 246-249; 12 de abril, 2002.

SEMICONDUCTOR SPINTRONICS AND QUANTUM COMPUTATION. Dirigido por D. D. Awschalom, D. Loss y N. Samarth. Springer Verlag, 2002.



1. KIM PEEK, discapacitado por trastornos del desarrollo, se sabe de memoria más de 7000 libros y los accesos viarios, códigos telefónicos y postales y emisoras de TV de todas las poblaciones estadounidenses. Inspiró el personaje de Raymond Babbit en la película *Rain Man*.

Rasgos geniales

Brillantez artística y memoria deslumbrante acompañan a veces al autismo y a otros trastornos del desarrollo

Darold A. Treffert y Gregory L. Wallace

Leslie Lemke es un virtuoso de la música. A los 14 años tocó sin vacilaciones ni tropiezos el Concierto Nº. 1 para piano de Tchaikovsky; sólo lo había oído una vez, horas antes, en la televisión. No había recibido lección alguna de piano; sigue sin haberla recibido. Es ciego y padece trastornos del desarrollo y parálisis cerebral. Sin embargo, toca y canta miles de piezas en conciertos que da por los EE.UU. y otros países, improvisa y compone.

Richard Wawro es internacionalmente famoso por sus trabajos artísticos. Los dibujos que hacía de niño con lápices de cera dejaron atónito a un profesor de bellas artes londinense, quien los calificó de "fenómeno increíble, realizado con la precisión de un mecánico y la visión de un poeta". Wawro, que vive en Escocia, es autista.

Kim Peek parece una enciclopedia ambulante: se sabe de memoria más de 7600 libros, puede decir de corrido todas las carreteras de cada ciudad, pueblo y condado de los EE.UU., así como sus códigos telefónicos y postales, las emisoras de televisión y las redes de teléfono de que disponen. Si se le da la fecha de nacimiento de alguien, dirá qué día de la semana fue y qué día será cuando cumpla 65 años y se jubile. Peek identifica muchísimas obras de música clásica y sabe el día que se publicaron o interpretaron por primera vez, dónde y en qué día nació el compositor y la fecha de su muerte. También él sufre trastornos del desarrollo; para muchas de las necesidades básicas de cada día depende de su padre. Sus habilidades inspiraron el personaje de Raymond Babbit, interpretado por Dustin Hoffman en la película *Rain Man*.

Lemke, Wawro y Peek tienen los tres el síndrome del *savant*, rara pero espectacular condición en la que un sujeto con diversas anomalías del desarrollo, el autismo una de ellas, exhibe pasmosos rasgos de pericia y brillantez yuxtapuestos, de la manera más chocante, a una discapacidad mental general. El síndrome del *savant* viene a darse en uno de cada 10 autistas y en uno de cada 2000 individuos que tienen dañado el cerebro o padecen retraso mental. De los *savants* conocidos, al menos la mitad son autistas, y el resto sufre algún otro tipo de trastorno del desarrollo.




VERMONT
KITSAP
BUSINESS
BUSINESS



2. LESLIE LEMKE es ciego y nunca ha estudiado piano. Aunque padece parálisis cerebral y trastornos del desarrollo que lo discapacitan, compone música y es capaz de ejecutar a la perfección miles de piezas, incluso habiéndolas oído una sola vez.

El síndrome del *savant* sigue siendo en la actualidad muy misterioso, pero gracias a los avances en la toma de imágenes cerebrales se va sabiendo más sobre él; una teoría, formulada hace largo tiempo, sobre los daños del hemisferio cerebral izquierdo ha hallado respaldo en estas tomas de imágenes. Además, nuevas informaciones acerca de la aparición repentina del síndrome del *savant* en sujetos que padecen ciertas formas de demencia mueven a pensar en la apasionante posibilidad de que algunos aspectos de estas genialidades estén latentes o adormecidas en todos nosotros.

La definición dada por Down

En la literatura científica hay ya una descripción del síndrome del *savant* en 1789. Benjamin Rush, el "padre de la psiquiatría americana", narró ese año la deslumbrante habilidad como calculador de Thomas Fuller; cuando le preguntaron cuántos segundos habría vivido un hombre de 70 años, 17 días y 12 horas de edad, dio minuto y medio después la respuesta correcta, 2.210.500.800 segundos (para ello hubo de tener en cuenta que 17 de los años de vida de aquel hombre habrían sido bisiestos).

Pero esta coexistencia de deficiencia y superioridad no tendría una exposición más completa hasta 1887, año en que J. Langdon Down, más conocido por haber identificado el síndrome que lleva su nombre, describió a 10 *savants*. Se le habían ido presentando esos casos durante los 30 años en que fue director del londinense manicomio de Earlswood. Acuñó para calificarlos el hoy descartado término de *idiot savant* (idiota sabio en francés), conforme a una terminología que se referiría luego con la palabra idiota a quienes tenían un cociente de inteligencia (CI) inferior a 25.

Desde la descripción de Down ha transcurrido más de un siglo. Hoy día, gracias a los aproximadamente 100 casos descritos por la literatura científica, sabemos bastante más de estas pasmosas habilidades. Ha quedado claro que el síndrome del *savant* se da, generalmente, en sujetos con CI entre 40 y 70 —aunque también puede darse con un CI de hasta 114—, que se presenta más en los varones, con una desproporción de entre 4 y 6 varones por cada mujer, y que puede ser congénito o adquirirse más adelante en la vida como secuela de alguna enfermedad (por ejemplo, de la encefalitis) o lesión cerebral.

Repertorio limitado

Las habilidades que el síndrome del *savant* comporta son, en la mayoría de los casos, limitadas. Suelen estar radicadas en el hemisferio cerebral derecho, lo que equivale a decir que sobre todo son artísticas, no simbólicas, visuales y motoras: habilidades para la música, las artes plásticas, las matemáticas y el cálculo, y otras diversas, como la aptitud para la mecánica o la destreza espacial. Contrastan con éstas las habilidades basadas en el hemisferio izquierdo, más secuenciales, lógicas y simbólicas; se cuentan entre ellas el lenguaje y la especialización lingüística [*véase* "Dos cerebros en uno", por Michael S. Gazzaniga; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1998].

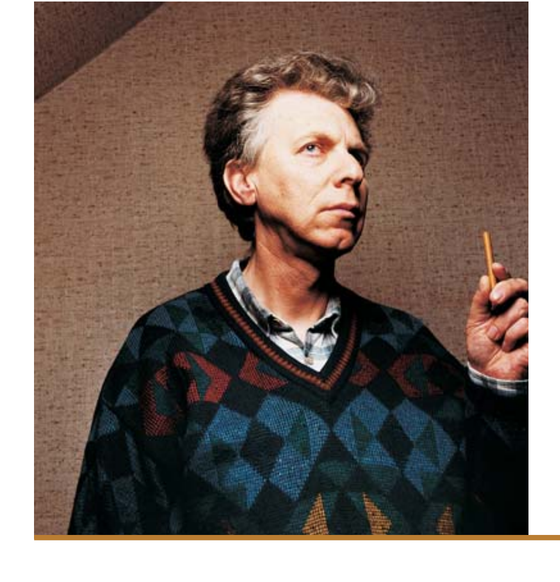
La mayoría de los *savants* músicos entonan perfectamente y ejecutan piezas con asombrosa facilidad, al piano sobre todo. Algunos son capaces de crear composiciones complejas. La genialidad musical parece acompañar con frecuencia a la ceguera y al retraso mental; es el caso de Lemke. Uno de los más famosos de los *savants* de este tipo fue el "Ciego Tom" Bethune —Thomas Wiggins— que vivió de 1849 a 1908. Le llamaban "la octava maravilla del mundo". Aunque apenas podía pronunciar ni 100 palabras, tocaba muy bien al piano más de 7000 piezas, muchas de ellas compuestas por él mismo. (Algunas de sus composiciones han sido grabadas hace poco por el músico John Davis.)

Los *savants* que destacan en las artes visuales se sirven de diversos medios, aunque lo más frecuente es que se expresen mediante el dibujo y la escultura. Por ejemplo, Alonzo Clemons puede ver la fugaz imagen de un animal en la pantalla de un televisor y esculpir en menos de 20 minutos una réplica perfecta. Su figura de cera será correcta en todos los detalles, reproduciendo cada fibra y cada músculo con las proporciones exactas.

Los *savants* matemáticos calculan con increíble rapidez y tienen, en muchos casos, especial facilidad con los números primos. Es curioso que la misteriosa capacidad de calcular el calendario que exhibe Peek







3. RICHARD WAWRO, pintor escocés de fama internacional que expone sus obras desde los 17 años, es autista.

no sea exclusiva de los *savants* matemáticos, sino que coexista, al parecer, con muchas otras destrezas.

Otros talentos de diverso tenor aparecen con menor frecuencia. Algún raro *savant* puede tener un gran don de lenguas, en el sentido de que memorice muchos idiomas, pero sin entenderlos. O contar con una fina sensibilidad olfatoria, táctil y visual, con vastos saberes de historia, neurofisiología, estadística o navegación, o con una gran destreza espacial. Así, una *savant* musical ciega, Ellen, deambula por bosques espesos u otros espacios inusuales sin tropezar con ningún objeto. Aprecia también a la perfección el paso del tiempo, aunque nunca ha leído reloj alguno, ni siquiera mediante el Braille. Se le descubrió esta habilidad un día en que su madre hizo que oyese por teléfono a la "mujer de las horas": tras escuchar durante un breve rato cómo la voz del disco iba cantando la hora, los minutos y los segundos, parece que Ellen puso en marcha su propio reloj interno; desde entonces ha sido capaz de decir la hora que es, con precisión de segundos, en cualquier estación del año.

Las destrezas de los *savants* van siempre vinculadas a una notable memoria, profunda, concentrada, basada en la recitación habitual, pero con poca comprensión de lo que están diciendo. Algunos de los primeros en observarla la llamaron con acierto "memoria irreflexiva". Down mismo la caracterizó como "adherencia verbal". Uno de sus pacientes fue un muchacho que, habiendo leído los seis volúmenes de la obra de Edward Gibbon *Historia de la decadencia y ruina del Imperio Romano*, podía recitarlos palabra por palabra, pero sin entenderlos en absoluto.

Los autores

DAROLD A. TREFFERT y GREGORY L. WALLACE se interesan desde hace tiempo por los *savants*. Treffert ejerce la psiquiatría en el Hospital de St. Agnes de Fond du Lac, Wisconsin, y viene investigando el autismo y el síndrome del *savant* desde 1962, año en que trató a su primer paciente con esas características. Wallace es investigador visitante del Centro de Investigaciones en Psiquiatría Social, Genética y del Desarrollo del Instituto de Psiquiatría de Londres. Trata actualmente de averiguar por qué es más probable que las habilidades de *savant* se den en los autistas.

Aunque comparten capacidades, incluida la memoria, el grado de habilidad de los *savants* varía mucho de unos a otros. Los "*savants* expertos en minucias" tienen cierta facilidad en la memorización de resultados deportivos o números de matrículas. Los "*savants* talentudos" poseen dones musicales o artísticos muy superiores a los que cabría esperar en personas con tales minusvalías. Y las destrezas de los "*savants* prodigiosos", individuos muy fuera de lo común, destacarían aun cuando se diesen en alguien normal. Es probable que no vivan hoy ni 50 "*savants* prodigiosos".

Sea cual sea su talento, los "*savants*" suelen conservarlo toda la vida. Con un uso continuo, lo mantienen e incluso mejoran. Y casi nunca es de temer que con la adquisición de pericias lingüísticas, sociales o relativas a la vida diaria se pierdan aptitudes tan maravillosas. Al contrario; su específico talento ayuda con frecuencia a los *savants* a establecer algún tipo de rutina o modo de vida normales (*véase el recuadro* "Vivir con el síndrome del *savant*").

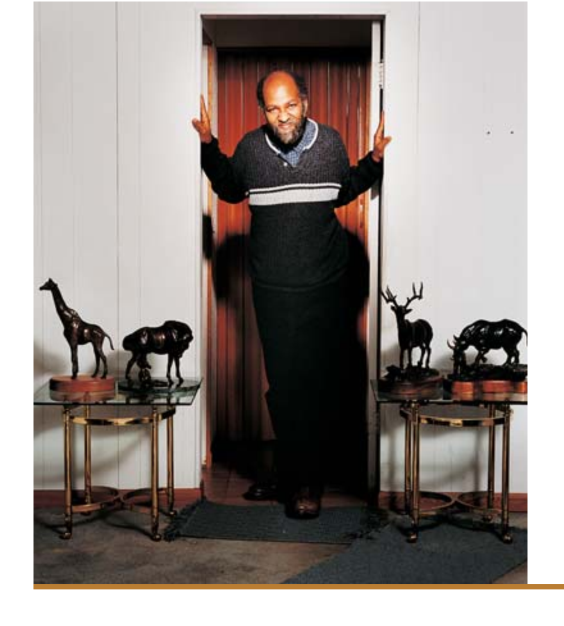
El hemisferio cerebral izquierdo

Aunque hoy los especialistas pueden describir mejor los talentos de los *savants*, no existe una teoría general que detalle cómo o por qué hacen lo que hacen. La explicación más convincente apunta que, cuando hay un deterioro en la parte izquierda del cerebro, la derecha lo compensa. Las pruebas que avalan esta idea se han ido acumulando a lo largo de varias décadas. En 1975 un estudio pneumoencefalográmico halló que 15 de 17 pacientes autistas tenían dañado el hemisferio cerebral izquierdo. (Un pneumoencefalograma era una técnica primitiva y dolorosa de toma de imágenes cerebrales: se inyectaba aire en el fluido espinal del paciente y se examinaba con rayos X su cerebro para ver a dónde había llegado el aire. Ya no se practica.)

Un sensacional estudio de T. L. Brink, psicólogo del Colegio Crafton Hills, en California, remachaba en 1980 la importancia de las alteraciones del hemisferio izquierdo en el síndrome del *savant*. Describía el caso de un chico normal de nueve años que se había quedado mudo, sordo y paralítico del lado derecho al herirle una bala el hemisferio cerebral izquierdo. Tras el accidente emergieron unas raras habilidades de *savant*







4. ALONZO CLEMONS está discapacitado por trastornos del desarrollo, pero copia en cera a la perfección cualquier animal que haya visto aunque sólo fuera durante unos instantes. Sus estatuillas de bronce le han hecho famoso en Estados Unidos.

mecánico: arreglaba bicicletas de piñón múltiple y creaba artilugios, por ejemplo un saco de boxeo que se meneaba y agachaba como un rival de verdad.

Los descubrimientos de Bernard Rimland, del Instituto de Investigación del Autismo, de San Diego, corroboran también esta idea. Mantiene la mayor base de datos que existe hoy en el mundo sobre autistas, con información de más de 34.000 individuos. Y ha observado que las habilidades de *savant* que más a menudo se presentan en los autistas son las relacionadas con las funciones del hemisferio derecho y que las capacidades que más les faltan son las del hemisferio izquierdo.

En los últimos años del decenio de 1980, Norman Geschwind y Albert M. Galaburda, de la Universidad de Harvard, propusieron algunas causas del deterioro del hemisferio izquierdo y de que sean más numerosos los *savants* masculinos. En su libro *Lateralización cerebral* hacen notar que lo normal es que el hemisferio cerebral izquierdo complete su desarrollo más tarde que el derecho y esté, por ende, sometido a influencias prenatales —algunas de ellas nocivas— durante un período más largo. Puede que la testosterona circulante actúe en el feto masculino como una de esas influencias dañosas y retarde el crecimiento y deteriore la función neuronal en el más vulnerable hemisferio izquierdo, con la frecuente consecuencia de que el derecho compense la merma haciéndose mayor y dominante en los varones. La cuantía superior de varones se da no sólo en el síndrome del *savant,* sino también en otras formas de disfunción del sistema nervioso, como la dislexia, el desarrollo retardado del lenguaje, el tartamudeo, la hiperactividad y el autismo.

Nuevos savants

En años recientes han ido saliendo a la luz más datos que corroboran la hipótesis del hemisferio izquierdo. En 1998 Bruce L. Miller, de la Universidad de California en San Francisco, examinó a cinco sujetos de edad avanzada que padecían demencia frontotemporal (DFT), una forma de demencia presenil. Estos pacientes, desde el comienzo y progresión de su demencia, habían ido desarrollando habilidades artísticas: eran capaces de hacer meticulosas copias de obras de arte y bellas pinturas. Tal y como les ocurre a los *savants*, la creatividad de estos cinco individuos era visual, no verbal. La tomografía computarizada mediante emisión de un solo fotón (TCESF) mostró que el deterioro cerebral afectaba en particular al hemisferio izquierdo. Miller examinó a otros siete pacientes en los que tras la aparición de DFT se había desarrollado una habilidad musical o plástica; también halló que tenían dañado el hemisferio izquierdo.

Miller, Craig Hou, de la Universidad de Washington, y otros compararon después esas imágenes con las de un autista *savant* artístico de nueve años de edad llamado DB. Los escáneres TCESF de DB revelaron que el flujo sanguíneo, aunque mayor que el normal en parte de su neocórtex, era menor en el lóbulo temporal izquierdo. (El neocórtex interviene en las funciones cognitivas de alto nivel; el lóbulo temporal se encarga de algunos aspectos de la memoria y de las emociones.) Miller espera estudiar a otros *savants* artistas para ver si coinciden los resultados. Pero que DB tenga la misma patología que las personas mayores que desarrollan, al contraer una DFT, talentos de *savant* es muy sorprendente; induce a pensar que pronto se conocerán con precisión los factores neurológicos asociados al síndrome.

Costará más determinar los factores fisiológicos de la al parecer ilimitada memoria de los *savants*. Según Mortimer Mishkin, del Instituto Nacional de la Salud Mental de Estados Unidos, la memoria posee diferentes circuitos neurales, entre ellos uno corticolímbico de alto nivel, para la memoria semántica o cognitiva, y otro corticoestrial, de nivel inferior, para la más primitiva memoria de hábitos, más a menudo llamada "memoria de procedimientos". La memoria de los *savants* parece ser de hábitos, no cognitiva.

Es posible que los mismos factores que lesionan el hemisferio intervengan en el deterioro de los circuitos mnémicos de nivel superior; en tal caso, los *savants* tendrían que depender de otros circuitos de la memoria de hábitos, más primitivos pero intactos. Quizá los deterioros cerebrales —ya sean producidos por hormonas, por enfermedades o por lesiones perinatales— hagan surgir en algunos casos ciertas capacidades del hemisferio




MILL 435
MILL 435

derecho vinculadas al funcionamiento de la memoria de hábitos. En esas situaciones puede aparecer el síndrome del *savant*.

¿Hay en todos nosotros un *Rain Man*?

Que de pronto surjan en personas con demencia unas habilidades semejantes a las de los *savants* plantea profundas cuestiones sobre el potencial encerrado en todos nosotros. Por ello, hay quienes tratan de sacar a luz "el pequeño *Rain Ma*n que llevamos dentro". Un grupo ha empleado la estimulación magnética transcraneal repetida (EMTR) en un estudio de 17 individuos normales, ocho hombres y nueve mujeres. Tracy Morrell, de la Universidad de Australia del Sur, Robyn L. Young, de la Universidad Flinders de Adelaida, y Michael C. Ridding, de la Universidad de Adelaida, aplicaron la estimulación magnética al área del lóbulo temporal izquierdo deteriorada en los pacientes de DFT estudiados por Miller.

En su trabajo, todavía no publicado, comunican que sólo dos participantes experimentaron la aparición de una serie de capacidades de corta duración (cálculo de fechas, pericia artística o una mejor memoria de hábitos). Otros descubrieron alguna destreza ocasional, que también duró sólo unas horas. Apuntan que quizá las habilidades de *savant* se den tan sólo en un pequeño porcentaje de la población normal, del mismo modo que aparecen exclusivamente en un pequeño porcentaje de la discapacitada.

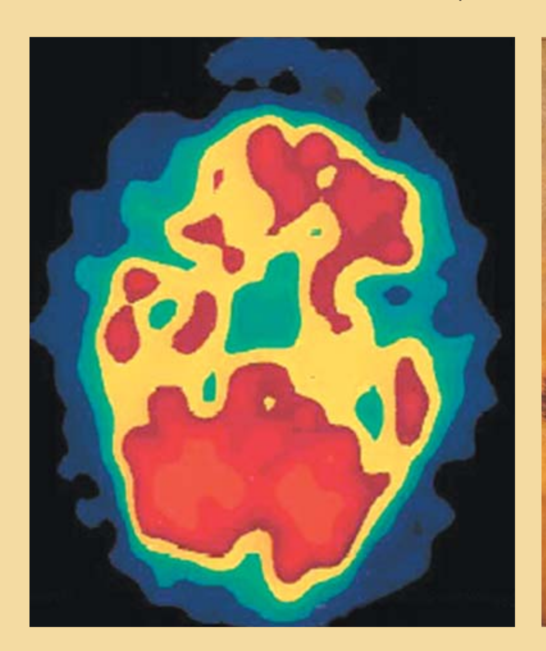
Sin embargo, muchos expertos creen que existen verdaderas posibilidades de explotar los aislados rasgos de genialidad *savant*. Allan Snyder y John Mitchell, del Centro para el Estudio de la Mente, de Canberra, sostienen que en cada uno de nosotros ocurren procesos cerebrales como los de los *savants*, sólo que la cognición conceptual, más depurada, los ahoga. Los *savants* autistas —concluyen— "tienen un acceso privilegiado a niveles de información inferiores que, por lo normal, no están al alcance de la introspección".

También opinamos nosotros que todos participamos un tanto de los circuitos y vías neurales inherentes a la conducta *savant*, aunque a los demás nos resultan, creemos, menos accesibles que a ellos: la razón, en parte, es el predominio social del hemisferio cerebral izquierdo. No obstante, a veces podemos hallar en nosotros mismos algunos de los elementos del *savant*: en ciertos momentos, "damos con algo" o descubrimos en nosotros una nueva capacidad. Y algunos procedimientos —entre ellos la hipnosis, las entrevistas de sujetos a los que se ha administrado amobarbital sódico y la estimulación neuroquirúrgica del cerebro— aportan indicios de que en todo ser humano subyace un enorme depósito de recuerdos latentes. También los sueños pueden hacer que revivan esos recuerdos o se desencadenen nuevas aptitudes.

Savants repentinos

Según investigaciones recientes, algunos individuos que padecen demencia frontotemporal (DFT) pintan muy bien, aunque antes no tuvieran tal talento. Con la demencia se han convertido en *savants* artistas.

Este cuadro de unos caballos (*derecha*) lo pintó uno de esos sujetos, una mujer de 64 años que sufría DFT. Bruce L. Miller, de la Universidad de California en San Francisco, ha examinado a muchos pacientes de DFT y documentado el deterioro del lado izquierdo de sus cerebros. Según cierta teoría, las habilidades de los *savants* quizá surjan en el hemisferio derecho, más artístico, como una forma de compensación del daño sufrido por el izquierdo. En esta imagen por TCESF (*izquierda*) de un paciente con DFT puede verse que en una parte del hemisferio derecho ha aumentado el flujo sanguíneo (*rojo*).





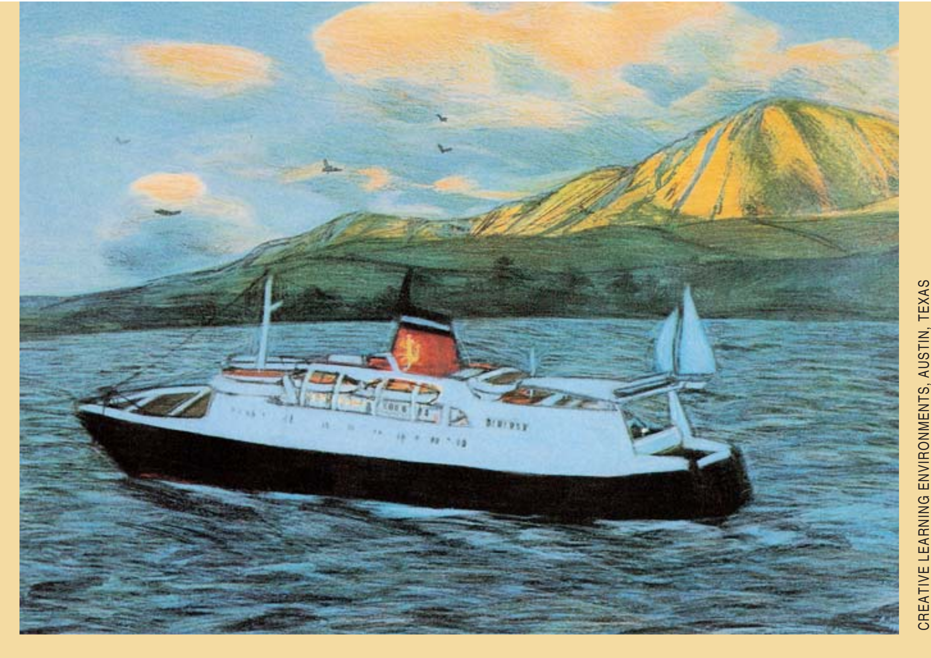
COURTESY OF BRUCE L. MILLER *U.C.S.F.*

Vivir con el síndrome del *savant*

Algunos estudios dan a entender que los *savants* pierden su especial talento artístico cuando se intenta mejorar su pericia con el lenguaje. El más famoso de estos casos es, quizás, el de Nadia, una autista que a los 3 años hacía unos dibujos asombrosos. A los 7 años ingresó en una escuela para niños autistas que centraba sus enseñanzas en la destreza verbal; así, al llegar a la adolescencia se expresaba mejor, pero ya no podía crear los complejos y brillantes dibujos de su primera infancia.

Nosotros no hemos sido testigos de esa incompatibilidad entre el talento artístico y el lenguaje o la socialización. Muy al contrario, vemos que la habilidad excepcional de un *savant* se fortalece con la normalización y es un cauce que lleva a ésta; el talento singular de que disfrutan ayuda a esos individuos a mejorar sus aptitudes sociales, a potenciar su dominio del lenguaje y a disfrutar de más independencia. Los *savants* llegan a sentirse realizados a causa de su talento; esta sensación les permite, a su vez, participar más de lleno en el mundo. El prodigio musical Leslie Lemke vive más animado, con sus conciertos y la recíproca influencia con el público. El pintor Richard Wawro siente placer y excitación cuando acaba un cuadro, y busca que se lo celebren. Y el portentoso memorizador Kim Peek ha salido del aislamiento social que le caracterizaba antes de que se rodara la película *Rain Man;* ahora recorre el país dando charlas a cientos de grupos escolares.

Por fortuna, va aceptándose que deben alentarse a la vez la normalización de estas personas y sus habilidades de *savants*. Se está introduciendo a los *savants* en cursos y clases especiales para superdotados; se promueven de esta forma su desarrollo social y el de sus condiscípulos. Algunos programas nuevos, por ejemplo el de la Universidad Hope de Anaheim, California, atienden en exclusiva a estos individuos excepcionales. Otros se dirigen también a sujetos con anomalías parecidas; por ejemplo, se han establecido campamentos musicales y de artes plásticas para los afectados por el síndrome de Williams, muchos de los cuales desarrollan habilidades musicales similares a las de los *savants* [*véase* "Síndrome de Williams", por Howard M. Lenhoff, Paul P. Wang, Frank Greenberg y Ursula Bellugi, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1998]. Educar su talento es el modo de tratarlos que mejores resultados da.



CREATIVE LEARNING ENVIRONMENTS, AUSTIN, TEXAS

EL FERRY DE TIREE, ESCOCIA. Richard Wawro pintó este cuadro en 1978. Cuida de él su padre, quien le anima con entusiasmo a pintar. La mayoría de los investigadores creen que el ejercicio de una habilidad artística como ésta puede ayudar a los *savants* a mejorar su integración social.

Una ventana hacia el interior del cerebro

Ningún modelo del funcionamiento del cerebro estará completo mientras no explique esta rara condición. Ahora que disponemos de los instrumentos con que examinar la estructura y el funcionamiento cerebrales, podremos hallar correlaciones entre sus resultados y los exámenes neuropsicológicos detallados de los *savants*. Confiamos en que los datos que se obtengan comparando grupos de individuos normales con otros de discapacitados, incluyendo prodigios, genios y *savants*, pronto ocupen el lugar de las reseñas de casos anecdóticos que caracterizaron la literatura pertinente en el último siglo.

El síndrome del *savant* abre una ventana única hacia el interior del cerebro en lo que se refiere a la contraposición entre la inteligencia general y una multiplicidad de formas de inteligencia. También podrá ilustrarnos sobre la plasticidad del cerebro y las compensaciones, reclutamientos de áreas cerebrales y reparaciones que tienen lugar en el sistema nervioso central, campos de estudio de capital importancia para llegar a entender y tratar enfermedades tan diversas como la apoplejía, la parálisis y el mal de Alzheimer.

Pero el síndrome del *savant* también tiene su importancia fuera del dominio científico. Son muchas las lecciones que se pueden aprender de estas personas, de sus familias, terapeutas y profesores. Una de las principales es que no deben lo que son tan sólo a unos determinados circuitos cerebrales: si salen adelante es gracias al amor incondicional, la fe y la determinación de quienes los atienden. El síndrome del *savant* promete llevarnos más lejos que nunca en la comprensión tanto del cerebro como del potencial humano.

Bibliografía complementaria

EMERGENCE OF ARTISTIC TALENT IN FRONTOTEMPORAL DEMENTIA. B. Miller, J. Cummings, F. Mishkin *et al.* en *Neurology*, vol. 51, n.º 4, págs. 978-982; 1 de octubre, 1998.

EXTRAORDINARY PEOPLE: UNDERSTANDING SAVANT SYNDROME. Darold A. Treffert. iUniverse.com.inc., 2000.

La complejidad del café

Uno de los sencillos goces de la vida es en realidad muy complicado

Ernesto Illy

Pocas son las experiencias cotidianas que pueden competir, como puro goce de los sentidos, con una buena taza de café. Ahora bien, esta bebida tan común encierra una profunda complejidad química. Sin un conocimiento detallado del modo en que los azares de la producción del grano, de su tueste y preparación afectan delicadamente a los centenares de compuestos que definen el sabor, el aroma y el cuerpo de un café, una buena taza de calidad se convertiría en una experiencia infrecuente y aleatoria.

Los conocedores están de acuerdo en que la quintaesencia del café es el *espresso*, o café exprés: una tacita de gruesa porcelana, llena a medias de una infusión oscura, opaca, sobre la que nada una espuma espesa, aterciopelada, pardorrojiza. Esta crema, cuya persistencia sorprende, se compone de diminutas burbujas de gas inmersas en películas muy finas; en su seno encierran los aromas característicos del café y gran parte de su calor. El nombre de *espresso* alude a que se hace por expreso encargo para cada ocasión. Se prepara mediante la rápida percolación de una pequeña cantidad de agua caliente a presión a través de una comprimida torta de café tostado finamente molido. El licor concentrado resultante no sólo contiene sólidos solubles, sino también una variada gama de sustancias aromáticas en emulsión, dispersas en diminutas gotitas de aceite que, en conjunto, proporcionan al *espresso* su riqueza de sabores, aroma y "paladar".

Los aficionados al café consideran que un *espresso* bien destilado es la modalidad reina: su especial preparación amplifica y pone de manifiesto las características intrínsecas de los granos. Conviene a nuestros propósitos en este artículo porque condensa en sí las numerosas técnicas con que se hace el café, sin olvidar el método turco y los diversos procesos de preparación por infusión o por goteo con filtro (*en el recuadro* "La preparación del café: otras técnicas" *se describen otros métodos de preparación del café*). Conocer el café exprés equivale a conocer el café en todas sus formas.

El café de alta calidad es resultado del estricto control de una miríada de factores, tanto en el campo de cultivo y en la planta misma como ya en la taza. El cultivo del cafeto entraña una multitud de variables que es preciso supervisar y regular. Una vez maduro el grano de café, nada se le puede añadir o eliminar: la calidad ha de encontrarse ya en él. Para cada dosis de *espresso* son necesarios de 50 a 55 granos de café tostado; basta un solo grano imperfecto para que el efecto sea perceptible en el todo. Ello se debe a que los sentidos del gusto y del olfato de los seres humanos fueron, en su origen, mecanismos de defensa que protegieron a nuestros antepasados de los alimentos pu-


TINA WEST

trefactos y, por lo tanto, nocivos. Sólo con las técnicas modernas resulta posible identificar, económica y sistemáticamente, cincuenta granos casi perfectos.

Cultivo del café

Los granos de café sin elaborar son las semillas de unas plantas pertenecientes a la familia de las rubiáceas, que comprende al menos 66 especies del género *Coffea*. Las dos especies explotadas comercialmente son *Coffea arabica*, que abarca dos terceras partes de la producción mundial, y *C. canephora*, a menudo denominada "café robusto", a la que corresponde el tercio restante. Las plantas de la variedad robusta, y todas las especies silvestres, tienen 22 cromosomas, mientras que la arábica consta de 44. No es posible, por consiguiente, el cruzamiento de la arábica y de otras especies de café para producir plantas híbridas.

El cafeto de la variedad robusta es un árbol de alto rendimiento, resistente a las enfermedades, que alcanza los 12 metros de altura, y cuyo medio más favorable es un clima caluroso y húmedo. Produce un café de mucho cuerpo, con un aroma más bien áspero, terroso, y un elevado contenido de cafeína, que oscila del 2,4 al 2,8 por ciento en peso. Aunque se trata de una variedad vendida por muchos proveedores, no es la que ofrece el café de máxima calidad.

La variedad arábica, originaria de las altiplanicies de Etiopía, es un árbol de rendimiento mediano a bajo, bastante delicado, de cinco a seis metros de altura. Requiere un clima templado y que se le preste un considerable cuidado. Los arbustos cultivados con fines comerciales se podan a una altura de 1,5 a 2 metros. El café preparado a partir de granos de arábica posee un aroma intenso, intrincado, que trae reminiscencias de flores, de fruta, de miel, de chocolate, de caramelo y de pan tostado. Su contenido de cafeína nunca excede del 1,5 por ciento en peso. A causa de su calidad y sabor superior, el precio del café arábica es más elevado que el de su pariente más recio y basto.



TINA WEST

Las lluvias copiosas inducen la floración de las plantas de arábica. Al cabo de unos 210 días aparecen frutos de color rojo o amarillo, llamados "drupas". Estas cápsulas contienen dos semillas oblongas, las habas o granos de café. Dado que en una misma rama pueden encontrarse simultáneamente la flor y el fruto, los instrumentos idóneos para recolectar sólo las cápsulas maduras son los dedos índice y pulgar del campesino. Si se benefician por completo las ramas, sea recogiendo a mano todas las "drupas" o utilizando máquinas cosechadoras automáticas, no se discrimina entre los frutos en sazón y los inmaduros.

La calidad definitiva de los granos de café resultantes dependerá de las características genéticas de la planta, del suelo donde crece y del microclima, que engloba altitud, pluviometría, insolación y variaciones diarias de temperatura. Junto con los procedimientos de tueste, estas condiciones agrícolas y geográficas determinan las diferencias de sabor entre las muchas variedades de granos de café que los proveedores combinan para producir las mezclas que salen al mercado.

El procesado del café

Las drupas del cafeto deben procesarse inmediatamente después de cosechadas; se estropean con facilidad. Dos son los métodos de elaboración de que se valen los productores: el secado al sol y el lavado. Un secado al sol eficaz se realiza extendiendo las drupas en un patio y removiéndolas con fre-

El autor

ERNESTO ILLY preside *illycaffè*, una empresa familiar, con sede en Trieste, fundada por su padre en 1933. Más de dos millones de cafés exprés *illy* se sirven diariamente tan sólo en Italia. Illy es doctor en química y ha realizado estudios avanzados en biología molecular.

cuencia, para que se calienten y oreen de modo uniforme. Ya secos, se hacen pasar los frutos por una máquina que aplasta las cápsulas y elimina el pergamino que rodea a las semillas, con lo que éstas —los granos— quedan sueltas y dispuestas para su clasificación y ensacado. En el otro método, enteramente mecanizado, se elimina la pulpa de los frutos; se lavan las semillas y se les quita el pergamino. Ambas vías se proponen idéntica meta: reducir el 65 por ciento de contenido de agua de las drupas al grado de humedad del 10 al 12 por ciento del grano de café en bruto, también llamado grano verde.

Uno de los grandes problemas que presenta la producción de café de calidad superior estriba en garantizar la calidad extra del grano verde de partida. Los productores de cafés de calidad se valen de muchas y muy refinadas técnicas de control del procesado para minimizar el porcentaje de granos de café defectuosos; entre ellos, el análisis mediante fluorescencia ultravioleta que detecta los granos mohosos y una representación tricromática con la que se genera una "huella" de color (verde-amarilla, roja e infrarroja) de cada lote de granos. El fabricante italiano *illycaffè*, como control final inmediatamente previo al tueste, aplica un sistema de clasificación dicromática desarrollado en colaboración con la firma británica Sortex. Conforme van los granos cayendo en recipientes, un sistema de células fotoeléctricas detecta los granos en mal estado y los señala para eliminarlos uno por uno mediante un chorro de aire expulsado desde una boquilla. La selección se efectúa a una velocidad que ninguna mano puede igualar (400 granos por segundo) y con una precisión inalcanzable para el ojo más entrenado y experto.

Los granos de café verde perfectamente maduros están compuestos por células con paredes de un espesor poco común: entre cinco y siete micras, algo excepcional en el reino vegetal. Durante el tueste, estas células, cuyo diámetro oscila entre 30 y 40 micras, actúan como diminutos reactores químicos; en ellas tienen lugar, promovidas por el calor, todas las reacciones químicas que generan el sabor seductor y la fragancia del café. Las células de los granos inmaduros tienen paredes más delgadas. Carecen los granos inmaduros de las importantes proteínas precursoras aromáticas que se desarrollan en los estados finales del proceso de maduración. Un grano fermentado está compuesto por células despojadas de estos cruciales componentes por mohos o bacterias.

El tueste del café

El tueste es un proceso pirolítico (inducido por calor) que multiplica la complejidad química del café. El aroma del café verde contiene unas 250 especies moleculares volátiles, mientras que el café torrefacto da origen a más de 800.

Sometida a fases de calentamiento en una máquina tostadora (un enorme cilindro rotatorio caliente), el agua residual del interior de cada célula se transforma en vapor, que fomenta una multitud de variadas y complejas reacciones químicas entre la plétora de azúcares, proteínas, lípidos y minerales del interior celular (*véase el recuadro* "Química del café"). A temperaturas elevadas, entre 185 y 240 ºC, los azúcares se combinan con aminoácidos, péptidos y proteínas de acuerdo con un proceso de caramelización bien conocido, la reacción de Maillard. Los productos finales son las parduzcas glicosilaminas y melanoidinas, entre dulces y amargas, que le dan al café su sabor principal. Se produce también dióxido de carbono (hasta 12 litros por kilogramo de café torrefacto.)

Aflora, a la vez, una extensa gama de moléculas aromáticas de menor masa; estos compuestos volátiles

El café, del que se consumen más de **400.000 millones de tazas** *anualmente, es la bebida más popular del mundo (sin contar el agua, claro está).*

✹

Sólo el petróleo *mueve más dinero que el mercado del café a escala mundial (unos 11.000 millones de euros en exportaciones, en el año 2000.)*

✹

Continúa la polémica sobre si debe promoverse el cultivo del **café de sotobosque** *para no dañar los hábitats de las aves.*

✹

El café y la cafeína han sido objeto de extensos estudios científicos a lo largo de los 25 últimos años; se publican entre **1500 y 2000 artículos al año** *al respecto. A pesar de tan minucioso escrutinio, han sido pocos los efectos negativos que se hayan podido asociar en firme al consumo moderado (***dos tazas diarias***) de café con cafeína. Más aún, trabajos recientes indican que el café torrefacto puede constituir una buena fuente de antioxidantes.*

✹

Entre 1000 a.C. y 500 d.C. *Los oromos, una tribu nómada que vivía en el reino de Kefa (en la moderna Etiopía), comían, como estimulante, café machacado que mezclaban con grasa y moldeaban en forma de albóndigas.*

Hacia el año 600 *Los mercaderes llevan a través del Mar Rojo el café a Arabia (al actual Yemen).*

Finales del siglo XV y comienzos del XVI *Los granos de café, que hasta entonces eran monopolio de Arabia, llegan a Turquía, Egipto y Siria llevados por peregrinos musulmanes de vuelta de La Meca. Por influencia árabe, se abrieron en Constantinopla, Damasco y otras ciudades del Próximo Oriente "cafeterías", donde los mercaderes occidentales, venecianos sobre todo, entraron en contacto con el café.*

En torno a 1600 *Calificándola de "la amarga invención de Satanás", los consejeros del Papa Clemente VII le instaron a rechazar la bebida favorita de los infieles otomanos. Pero Clemente otorgó al café la autorización papal, haciéndolo así aceptable para los católicos.*

1616 *Los empresarios holandeses comienzan a cultivar la planta del cafeto, que habían obtenido de Yemen. En* **1658***, o en el último decenio del siglo XVII según otras fuentes, los holandeses están ya cultivando café en Ceilán y en la colonia que habían establecido en Java.*

1714 *El alcalde de Amsterdam obsequia a Luis XIV de Francia con una planta de café traída de Java.*

1723 *Gabriel Mathieu de Clieu, un oficial de la marina francesa, consigue llevar, tras un viaje lleno de peligros, tres plantones de cafeto, obtenidos en dudosas circunstancias en los Reales Jardines Botánicos, hasta la isla de la Martinica, en el Caribe. Una de las plantas medra.*

1727 *Tras haber sido llamado para arbitrar una disputa fronteriza entre dos colonias cultivadoras de café, la Guayana holandesa y la Guayana francesa, un portugués, Francisco de Melho Palheta, introduce de contrabando varios plantones de cafeto en sus propiedades brasileñas.*

1903 *El alemán Ludwig Roselius, importador de café, perfecciona el café descafeinado.*

1933 *Francesco Illy patenta la primera máquina automática de café exprés.*

1961 *Ernesto Valente, de Faema, fabricante italiano de máquinas de café, diseña el modelo de las máquinas modernas de café exprés.*

confieren al café su fragancia familiar. En el interior de cada célula la presión se eleva hasta unas 20 o 25 atmósferas: el vapor de agua y el dióxido de carbono tratan de escapar y se encuentran herméticamente encerrados entre las gruesas paredes celulares, de baja porosidad y revestimiento oleaginoso. Algunas células acaban por reventar; así se produce la crepitación característica del café al ser tostado. Durante el tueste, el volumen del grano aumenta en la mitad o más; su masa, en cambio, disminuye en una quinta parte.

En función de la temperatura y de los procedimientos aplicados, el tueste puede durar desde tan sólo 90 segundos hasta 40 minutos. La duración tradicional es de 12 minutos. La termodinámica de las reacciones intracelulares difiere en función del tiempo de tostado; otro tanto sucede con el resultado final. Un tiempo breve, que requiere una gran aportación de energía térmica, minimiza la pérdida de peso, pero confiere a la taza un sabor metálico, resultante de la presencia de polifenoles que no han tenido tiempo bastante para reaccionar debidamente. Los largos períodos de tueste, que suelen aplicarse en países pobres, donde los consumidores sólo pueden permitirse granos defectuosos, de bajo precio, fuerzan a todos los aromas y fragancias indeseables a abandonar los granos. Por desgracia, también desaparecen con ellos los sabores y aromas deseables; se produce un brebaje bastante amargo.

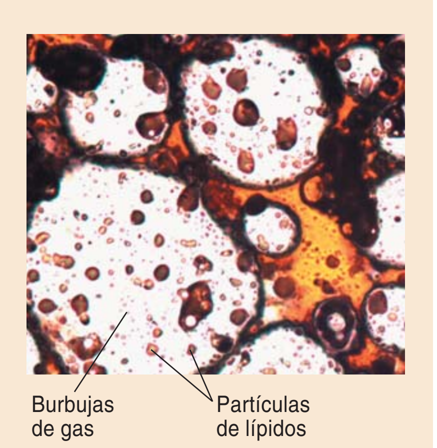
Cuanto más elevada sea la temperatura final del tueste, tanto menos deseable será el aroma y más intenso el amargor. Recíprocamente, el tueste a baja temperatura no logra desarrollar del todo los aromas deseables y tiende a acentuarse la acidez.

El aroma del café

La ciencia de los aromas es muy compleja. Para analizar las fragancias que van produciéndose durante el tueste se recurre a la cromatografía de gases en conjunción con la olfatometría; en ésta, catadores expertos olfatean y definen el olor de cada elemento reconocible. A menudo se utiliza después la espectrometría de masas para identificar la composición química de cada olor. El olfateo de los aromas del café tostado fraccionados por un cromatógrafo de gases es una experiencia iluminadora: se pueden distinguir aromas de rosas, de té de Darjeeling, de chocolate, de vainilla y de violetas, así como de trufas, sopa, queso, sudor e incluso del llamado olor a gato, que diluido es como el del vino sauvignon blanco, si bien re-

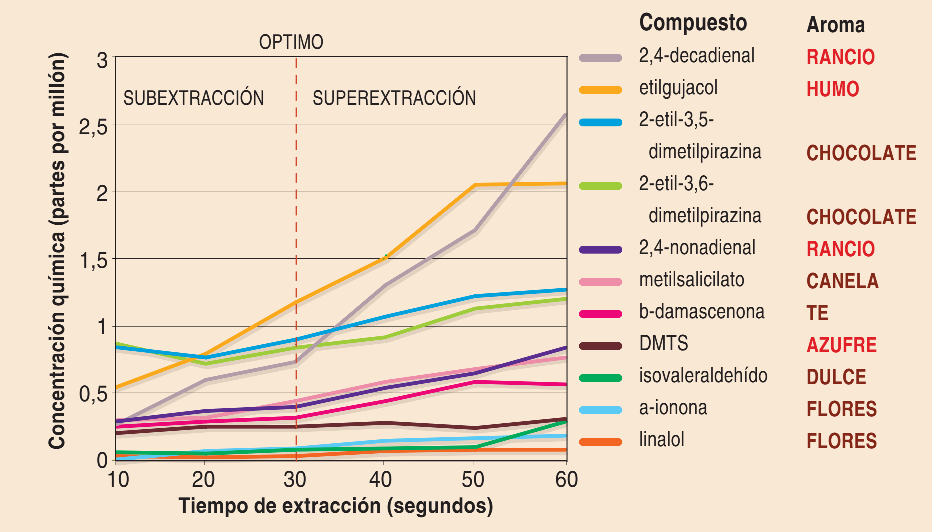
QUIMICA DEL CAFE

Esta es una sección transversal ampliada de la crema, la espuma densa de color pardorrojizo que recubre el café exprés. Consta de diminutas burbujas de dióxido de carbono y de vapor de agua (*círculos grandes*), rodeadas por películas tensioactivas; contiene también aceites emulsionados portadores de compuestos aromáticos cruciales (*partículas de contornos rojizos*) y fragmentos oscuros procedentes de la estructura celular del grano.

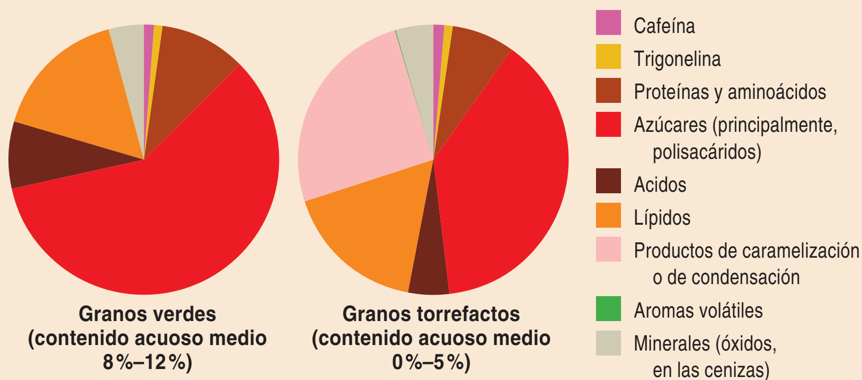


Composición química acumulativa del café exprés, en función del tiempo de extracción

La superextracción del café exprés (más de los 30 segundos recomendados) produce la incorporación a la bebida de compuestos aromáticos indeseables menos solubles (*impresos en rojo*)



Composición química del café arábica en verde y torrefacto (porcentaje de materia seca)



ILLYCAFFÉ (*micrografía*); NINA FINKEL (*gráficos*)

LA PREPARACION DEL CAFE: OTRAS TECNICAS

Métodos de goteo y filtro (goteo automático, Melitta, cafeteras Chemex). Este procedimiento, muy popular, se vale de café finamente molturado, depositado en un receptáculo revestido con papel de filtro. Con los filtros de oro reutilizables la moltura debe ser mediana. Dos son las claves para preparar café superior mediante dichos procesos: la primera, hacer correr agua hirviendo por el filtro para eliminar el olor del papel; la segunda, asegurarse de que el agua, que ha de estar casi hirviendo, no tarda más de entre cuatro y seis minutos en atravesar la moltura, porque así se obtienen los niveles óptimos de extracción. El tiempo de preparación en una máquina de goteo automático se puede controlar ajustando la cantidad de agua de manera que fluya durante los cuatro a seis minutos recomendados.

Prensa francesa o método de inmersión. Este aparato empapa el café molido en agua caliente y filtra los posos. El agua caliente y el café, que se muele grueso, se combinan en la cafetera; deben dejarse entre dos y cinco minutos de infusión, según lo fuerte que se desee la bebida. A continuación se va introduciendo lentamente el filtro-pistón de malla de alambre a través de la infusión para separar los posos, que quedan en el fondo de la cafetera.

Método turco. A diferencia de los demás métodos, en éste es deseable que el café hierva a fuego lento. Se mezclan a partes iguales café pulverizado, agua y azúcar en un recipiente especial llamado *ibrik*, que se pone directamente sobre el calor. Se agita la mezcla mientras se llega al hervor a fuego lento. Se deja de remover cuando el café pulverizado ya no se adhiera a una cucharilla. Cuando el brebaje empieza a hervir y a espumar, se retira el *ibrik* del fuego. Se golpea ligeramente el *ibrik* para reducir un poco la espuma. Se repite el proceso por lo menos dos veces más. El resultado es una bebida de un dulzor y espesor únicos.

Adaptado de The Great Coffee Book, de *Timothy J. Castle y Joan Nielsen (Ten Speed Press, Berkeley, California, 1999).*



TINA WEST

sulta repulsivo en una muestra concentrada.

En los laboratorios de *illycaffè*, los técnicos se concentran en los elementos aromáticos más intensos. Imagínese escuchando una grabación de un coro de 800 voces que contase con potentes solistas que dominaran el conjunto. Al bajar el volumen de reproducción, las voces más vigorosas seguirían siendo reconocibles, aun cuando el sonido del coro se perdiese. Algo similar ocurre al diluir el aroma del café: a partir de cierto umbral sólo se perciben los compuestos más intensos. Por desgracia, las moléculas más potentes del aroma de una muestra de café son las que se originan en granos defectuosos.

Ciertas moléculas, como el etilbutanato y el etilglicolato, causantes del olor desagradable de los granos inmaduros, echan a perder, con su sola presencia, una taza de café. Análogamente, las moléculas de metilisoborneol y de tricloroanisol (TCA) producen el olor terroso, químico, característico de los cafés de la variedad robusta. El TCA, también llamado “sabor de Río”, porque se descubrió en cafés cultivados cerca de Río de Janeiro, se halla en vinos embotellados. El umbral de percepción para el olfato humano es pasmosamente bajo: unos 6×10^{-15} gramos por mililitro.

Preparación del café

El siguiente paso importante de la transformación de los granos tostados en café exprés consiste en la extracción, por medio de agua caliente, de los componentes activos del café torrefacto y molido. La interacción del agua caliente y el café molido cuando se prepara café exprés difiere por completo de la producida en el método de goteo.

Cuando el café se prepara por goteo y con filtro, el agua caliente pasa a través de un agregado poco compacto de partículas de café molido de tamaño mediano. Durante los cuatro a seis minutos de contacto con el agua hirviente, se disuelven la mayoría de las sustancias solubles presentes en el café torrefacto. En esas condiciones llegan disueltas a la taza grandes cantidades de cafeína y de ácidos muy solubles. Por el contrario, en el *espresso* el tiempo de percolación es mucho más breve; se incluyen en el líquido final una cantidad de ácido mucho menor y sólo el 60 o el 70 por ciento de la cafeína.

La elaboración del *espresso* exige equipos especiales, capaces de calentar el agua hasta unos 92 o 94 ºC y someterla a una presión de unas 9 atmósferas. El café, con molienda de mediana a fina, se coloca en una cestilla perforada; hay que prensarlo para que se cree un lecho compacto de partículas. Las partículas comprimidas se adhieren entre sí gracias a una fina película oleaginosa que las recubre, tan viscosa como la miel. Al ligar las partículas, el aceite forma un laberinto condensado de diminutos pasadizos de aire. Se ha comprobado experimentalmente que la resistencia hidráulica de este lecho de café molido tiene que ser un poco menor que la presión del agua de extracción casi hirviente para que ésta fluya a través del mismo a una velocidad de 1 mm por segundo.

Aplicando los 30 segundos de percolación recomendados, un *barista* diestro prepara unos 30 mililitros de un denso licor de café recubierto por la importantísima crema. Si este recubrimiento cremoso adquiere un color claro, significa que se ha subextraído el exprés, seguramente porque la moltura fue demasiado gruesa, la temperatura del agua demasiado baja o el tiempo de percolación demasiado corto. Pero si la crema es muy oscura y presenta una especie de hoyo en la región central, habrá que culpar a los posos, muy finos o en cantidad excesiva. Un exprés superextraído exhibe, bien una espuma blanquecina con grandes burbujas si el agua estaba demasiado caliente, bien un mero manchón blanco en el centro de la taza si se prolongó en demasía el tiempo de percolación.

El proceso de percolación también arrastra componentes que se encuentran en la superficie de las partículas del café molido, entre ellos aceites aromáticos y porciones de la estructura celular. La elevada presión generada por la máquina de café exprés logra la emulsión de una pequeña cantidad de los aceites, que ronda los 0,1 gramos por taza. Las células intactas en el café molido crean una fina efervescencia; la generan los gases (dióxido de carbono, sobre todo) que atraviesan los minúsculos poros de las paredes celulares. También puede suceder que algunos posos muy finos se abran paso hasta la infusión junto con fragmentos de pared celular; dotan a la espumosa crema de su aspecto de piel de tigre.

El resultado final es un sistema coloidal polifásico, donde las moléculas de agua se encuentran ligadas a las burbujas de gas dispersadas, a gotitas de aceite y a fragmentos sólidos, todo ello de tamaño inferior a las cinco micras. El carácter coloidal de la dispersión confiere al líquido mucho cuerpo, elevada viscosidad y moderada tensión superficial. El café exprés cubre así visiblemente nuestra lengua y continúa liberando compuestos volátiles disueltos en los aceites emulsionados en tanto permanece en ella. Gracias a estos portadores oleaginosos de sabores y fragancias, el magnífico sabor y aroma de un buen *espresso* se sigue degustando hasta 20 minutos después de haberlo bebido. Felizmente, para gozar de este placer no se precisa saber nada de la compleja química del café.

Bibliografía complementaria

COFFEE: BOTANY, BIOCHEMISTRY AND PRODUCTION OF BEANS AND BEVERAGE. M. N. Clifford y K. C. Willson. Croom Helm, Londres, 1985.

CAFFEINE, COFFEE AND HEALTH. Recopilación de S. Garattini. Raven Press, 1993.

ESPRESSO COFFEE: THE CHEMISTRY OF QUALITY. A. Illy y R. Viani. Academic Press, 1995.

COFFEE: RECENT DEVELOPMENTS. R. J. Clarke y O. Vitzthum. Blackwell Science, 2001.

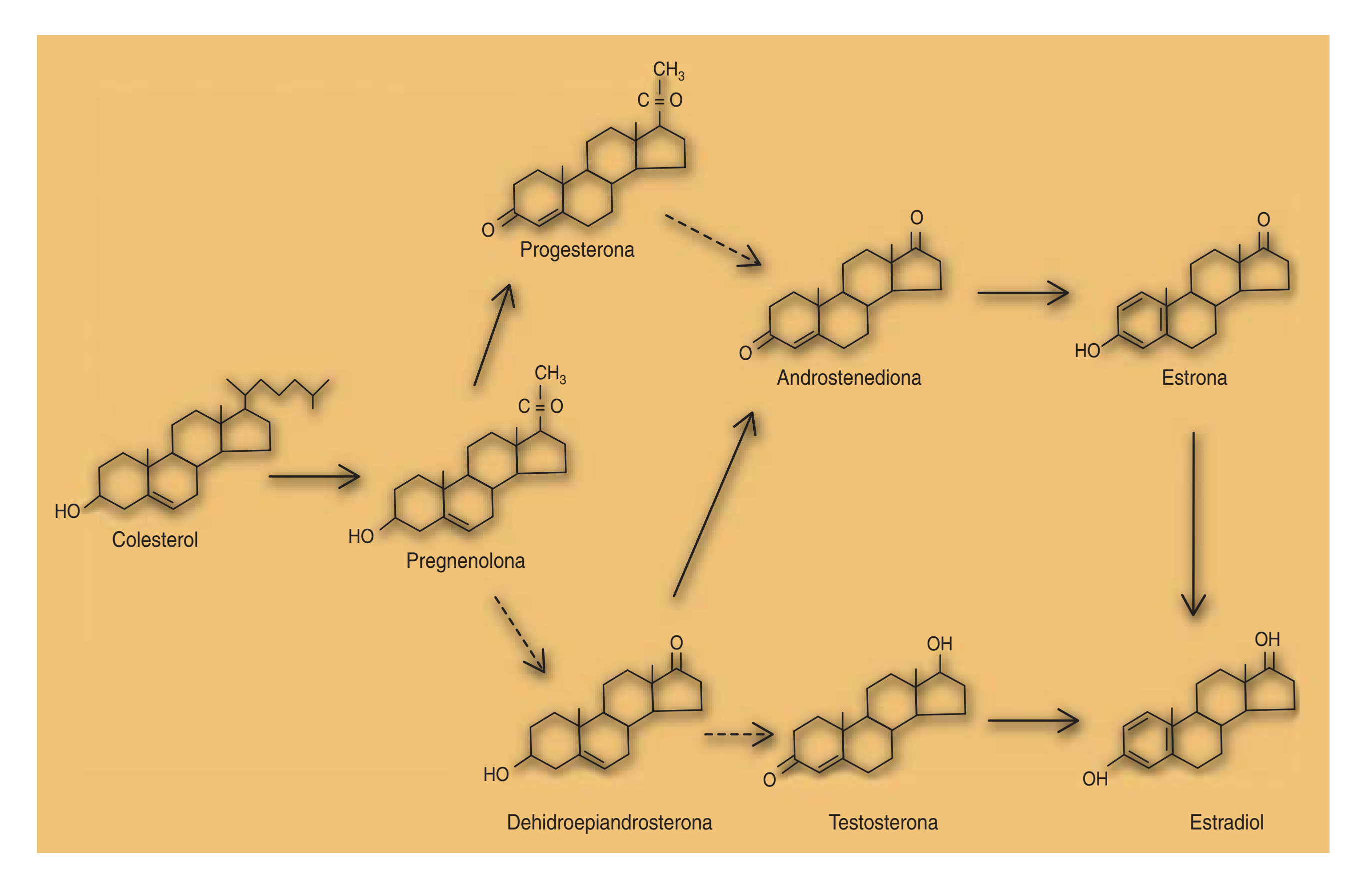
Los estrógenos y el sistema vascular

La investigación de los efectos ejercidos por los estrógenos sobre el sistema vascular sugiere esperanzadoras aplicaciones para la prevención de ciertas enfermedades

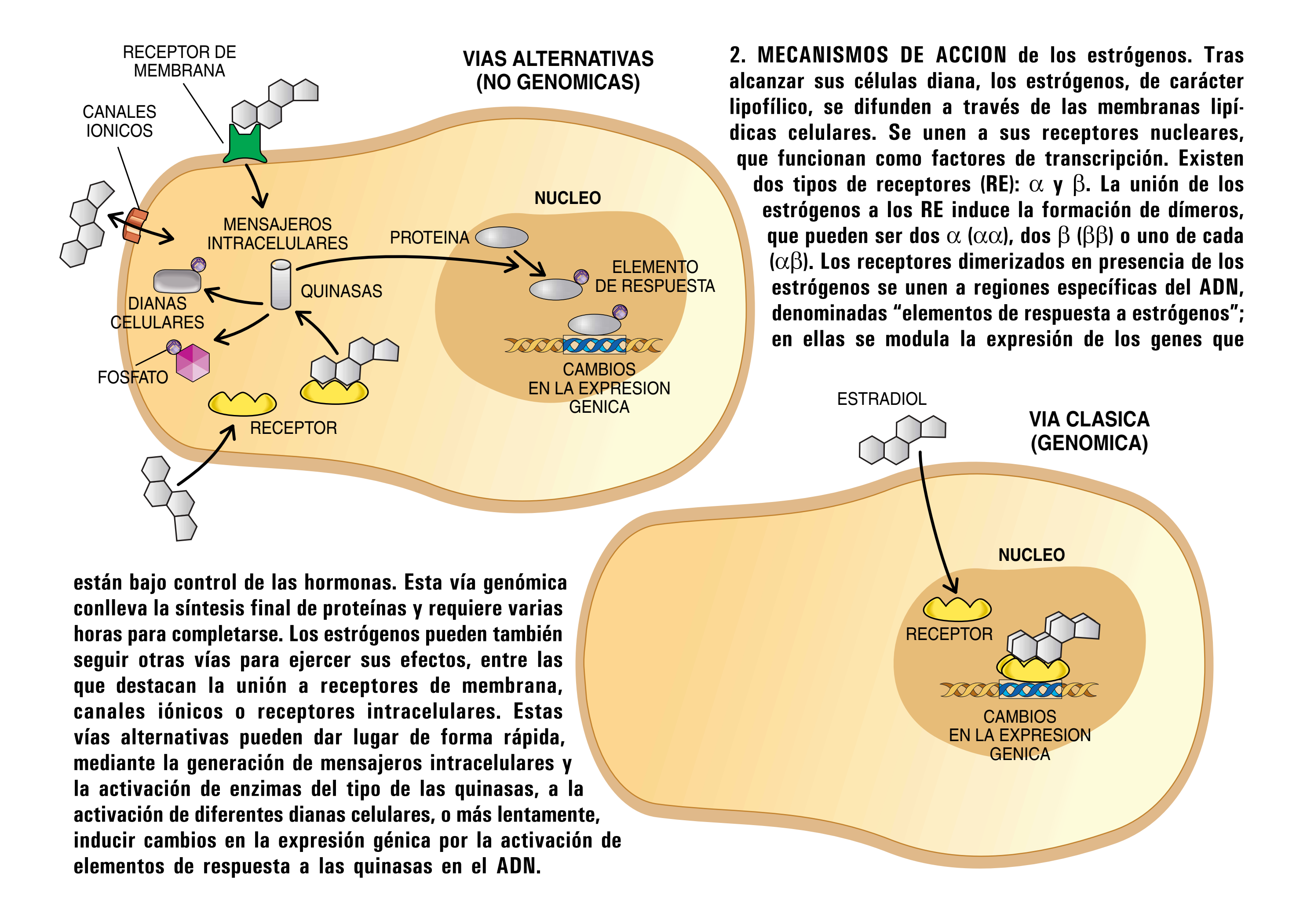
Miguel A. Valverde, Francisco Muñoz y Ramón Latorre

Pese a sus manifestaciones fácilmente reconocibles, los estrógenos constituyen una de las hormonas que encierran más incógnitas de cara a la investigación científica. El estradiol, un estrógeno abundante, es una hormona ovárica. En cuanto hormona actúa como un mensajero

1. LOS ESTROGENOS se sintetizan a partir del colesterol en el ovario a lo largo de la etapa fértil de la mujer. En la figura se representan las dos vías principales de síntesis. Ambas presentan etapas intermedias con formación de compuestos androgénicos (androstenediona, dehidroepiandrosterona y testosterona), que, por la acción de la enzima aromatasa, se convierten en estrógenos: estrona y 17β-estradiol. El esteroisómero 17α-estradiol sólo difiere del 17β-estradiol por la orientación espacial del grupo –OH en la posición 17. Pero basta tan pequeña variación para impedir que el 17α-estradiol se una al receptor de estrógenos. Las flechas discontinuas reflejan varios pasos intermedios en el proceso.



MIGUEL A. VALVERDE, FRANCISCO MUÑOZ Y RAMON LATORRE



2. MECANISMOS DE ACCION de los estrógenos. Tras alcanzar sus células diana, los estrógenos, de carácter lipofílico, se difunden a través de las membranas lipídicas celulares. Se unen a sus receptores nucleares, que funcionan como factores de transcripción. Existen dos tipos de receptores (RE): α y β. La unión de los estrógenos a los RE induce la formación de dímeros, que pueden ser dos α (αα), dos β (ββ) o uno de cada (αβ). Los receptores dimerizados en presencia de los estrógenos se unen a regiones específicas del ADN, denominadas "elementos de respuesta a estrógenos"; en ellas se modula la expresión de los genes que están bajo control de las hormonas. Esta vía genómica conlleva la síntesis final de proteínas y requiere varias horas para completarse. Los estrógenos pueden también seguir otras vías para ejercer sus efectos, entre las que destacan la unión a receptores de membrana, canales iónicos o receptores intracelulares. Estas vías alternativas pueden dar lugar de forma rápida, mediante la generación de mensajeros intracelulares y la activación de enzimas del tipo de las quinasas, a la activación de diferentes dianas celulares, o más lentamente, inducir cambios en la expresión génica por la activación de elementos de respuesta a las quinasas en el ADN.

MIGUEL A. VALVERDE, FRANCISCO MUÑOZ Y RAMON LATORRE

químico, transmitiendo la información necesaria para la regulación de las funciones de los diversos órganos y células.

Las acciones principales de los estrógenos se encuentran íntimamente asociadas a la programación del cuerpo femenino para la reproducción. Pero el estradiol no se limita a moldear el fenotipo femenino, sino que modula también el sistema cardiovascular y el óseo. El resultado del efecto del estradiol sobre el lecho vascular parece reflejarse en una menor susceptibilidad de las mujeres a padecer enfermedades coronarias durante su etapa fértil, cuando se produce y libera dicha hormona en los ovarios.

Las arterias, que transportan la sangre a los tejidos, se organizan en tres capas concéntricas fundamentales: una interna constituida por células endoteliales, una capa media compuesta por fibras musculares lisas (a diferencia de la musculatura esquelética que presenta estriaciones) y una capa externa formada por fibroblastos y colágeno.

La capa interna, o endotelio, se halla en contacto directo con la sangre que fluye por los vasos. Participa en la hemostasia, un sistema que el organismo utiliza para defenderse de agresiones vasculares. Este sistema se encarga de mantener la sangre en estado fluido favoreciendo su difusión por el organismo, pero en situaciones en las que se daña la pared vascular responde de un modo rápido y local mediante la formación de un coágulo, que evita la hemorragia. Concierne también al endotelio regular el tono vascular y vasomotor, esto es, el nivel de contracción de las fibras musculares lisas que determina el diámetro del vaso y, por tanto, el flujo de sangre.

En la capa media, la contracción de la fibra muscular requiere el aumento del calcio (Ca^{2+}) intracelular, proceso conocido como acoplamiento entre estímulo y contracción. Este aumento del Ca^{2+} puede deberse a su liberación desde depósitos intracelulares o a la entrada de calcio extracelular a través de canales de iones presentes en la membrana celular y activados por cambios de voltaje. La despolarización del potencial de membrana (el potencial se hace menos negativo), junto con el aumento del Ca^{2+} intracelular cooperan para activar los canales de potasio (K^+). El canal Maxi-K^+ se distingue por su gran conductancia para el paso de los iones K^+; permite la salida de iones K^+ del interior celular y la recuperación consiguiente del potencial de membrana hacia valores más negativos (hiperpolarización), lo que se traduce en una vasorrelajación y restauración del tono vascular inicial.

En el control del tono vascular intervienen elementos liberados por el sistema nervioso autónomo y sustancias vasoactivas secretadas localmente, sobre todo por el endotelio. Entre los vasoconstrictores se encuentran endotelinas, tromboxanos y radicales libres; destacan, entre los agentes vasorrelajantes producidos por el endotelio, las prostaglandinas y el óxido nítrico (NO), siendo este último la primera molécula gaseosa que se haya demostrado que funcione como un mensajero intercelular [*véase* “La actividad biológica del endotelio celular”, por Salvador Moncada y Patricio López-Jaramillo, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1991].

La interacción entre el endotelio y la fibra muscular lisa se desarrolla a través de varios pasos. En primer lugar, los estímulos mecánicos, así el estiramiento de la célula endotelial, o químicos, la liberación de acetilcolina por las terminaciones nerviosas, determinan la apertura de canales de Ca^{2+} en la célula endotelial. Con el aumento de Ca^{2+} en la célula endotelial, se activa la óxido nítrico sintasa, enzima que cataliza la síntesis de NO, o se liberan otros factores vasoactivos. A continuación, el NO y los otros factores se difunden en la fibra muscular, donde regulan el acoplamiento entre el estímulo y la contracción muscular.

Efectos vasculares de los estrógenos

El efecto de los estrógenos sobre el sistema cardiovascular puede ejercerse de un modo sistémico o local. En ambas situaciones, los mecanismos de acción implican rutas genómicas, con efecto a largo plazo, y vías no genómicas, de efecto rápido.

Desde hace tiempo se conocía el efecto sistémico de los estrógenos sobre las lipoproteínas séricas (lípidos circulantes en la sangre), pero el primer gran estudio epidemiológico tardó en llegar. En el trabajo en cuestión se observó que las mujeres sometidas a tratamiento con estrógenos

Estructura y activación del canal Maxi-K

Los canales de iones son macromoléculas proteicas que proporcionan un conducto acuoso a través de la bicapa lipídica de las membranas celulares, principalmente en la membrana que delimita la célula. Sirven de vía de paso a los iones (elementos con carga eléctrica como el Na^+, K^+, Ca^{2+} o Cl^-), para así facilitar el desarrollo de numerosos procesos celulares que van desde la transmisión del impulso nervioso hasta la contracción muscular, pasando por la generación de la secreción acuosa que cubre las vías respiratorias.

El funcionamiento de los canales de iones requiere una distribución asimétrica de los iones dentro y fuera de la célula, lo que origina una diferencia de potencial eléctrico entre el interior y el exterior celular. La apertura de un canal de iones conlleva el movimiento del ion permeante desde el medio de mayor hacia el de menor concentración; en esa difusión se genera una corriente eléctrica.

La proteína que forma el canal Maxi-K, cuyo nombre alude a su alta conductancia eléctrica, consta de siete segmentos que atraviesan la membrana celular (S0-S6). Desde el segmento S1 hasta el S6 es muy parecida a las proteínas que dan origen a otra familia de canales de potasio activados por cambios en el voltaje (canales Kv).

En particular, el segmento S4 contiene varios aminoácidos dotados de carga positiva, separados entre sí por dos aminoácidos hidrófobos. Este segmento, conocido como sensor de voltaje, se conserva en todos los canales de potasio Kv; su desplazamiento en el campo eléctrico como consecuencia de cambios en el voltaje a través de la membrana celular promueve la apertura del canal.

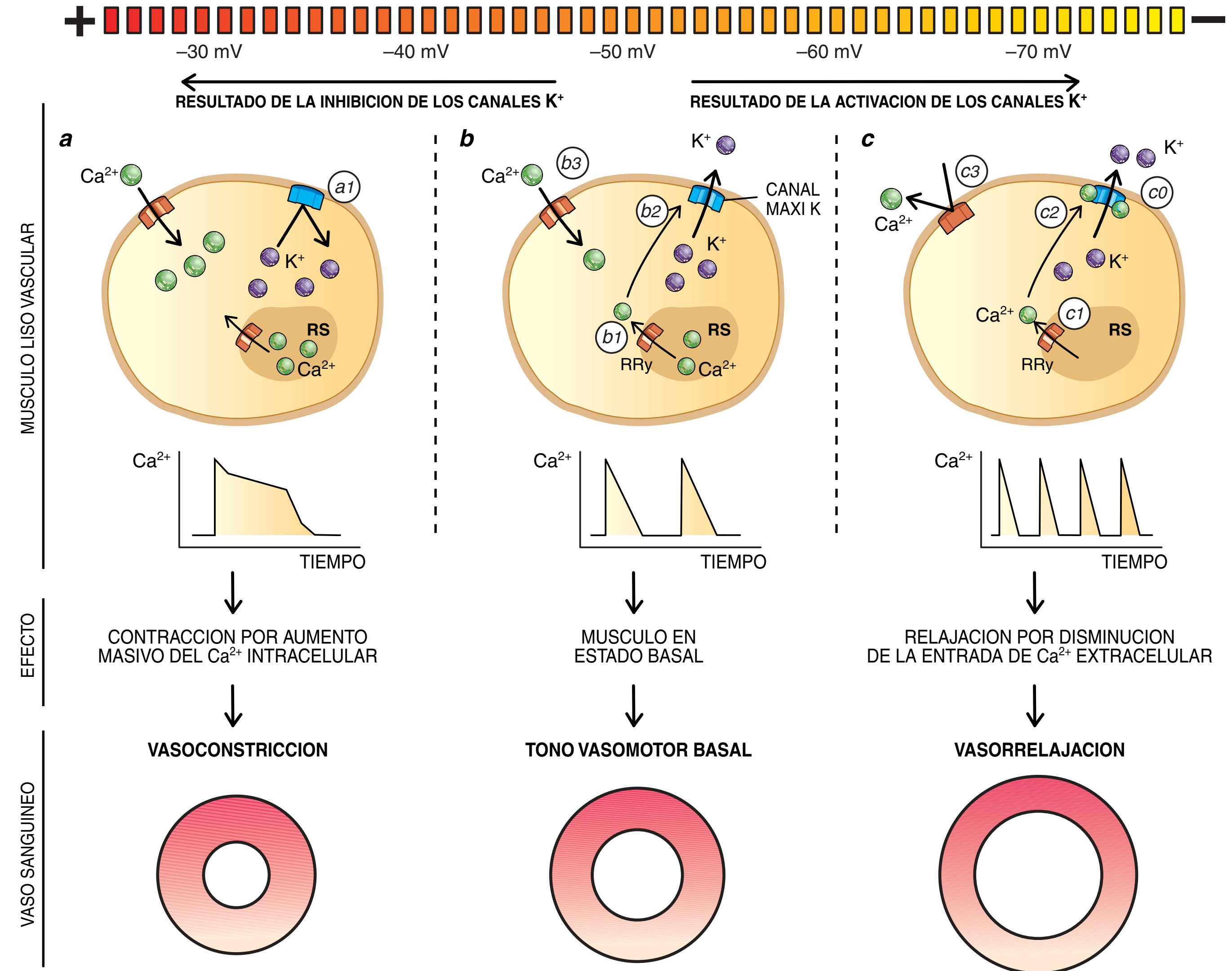
Entre los segmentos S5 y S6 se encuentra la región del poro (región P), ahorquillada, donde se ubica una secuencia de aminoácidos (VGYGD), la “secuencia firma”, que es prácticamente igual en todos los canales de potasio.

La estructura cristalina de un canal de potasio de la bacteria *Streptomyces lividans*, desentrañada por el equipo de Rod MacKinnon muestra que la “secuencia firma” es parte del filtro en donde se selecciona el ion potasio sobre los otros iones. La proteína contiene, además, un gran terminal carboxilo; aquí se alojan los sitios de unión de calcio que probablemente estén constituidos por residuos de aspartato en lo que se ha denominado la “taza de calcio”.

El canal Maxi-K es un homotetrámetro formado por cuatro subunidades α. Se abre al paso de los iones cuando cambia el potencial eléctrico celular, haciéndose más positivo el interior celular. En su operación influye también el calcio, probablemente disminuyendo la energía necesaria para desplazar el sensor de voltaje en respuesta a cambios despolarizantes del potencial de membrana.

En el músculo liso vascular, cada subunidad α del Maxi-K viene acompañada por una subunidad $\beta1$ que lo modula, haciéndolo más sensible al calcio. La subunidad $\beta1$ es una proteína que consta de dos segmentos que atraviesan la membrana, unidos por un lazo externo de unos 120 aminoácidos. Hasta el momento se han identificado 4 subunidades β ($\beta1$-$\beta4$) en diferentes tejidos.

La modulación del canal Maxi-K por los estrógenos requiere la presencia de las dos subunidades del canal, α y $\beta1$. El estradiol, mediante su interacción con la subunidad $\beta1$, induce una mayor salida de K^+ a través de la subunidad α, en respuesta al mismo estímulo eléctrico. Este efecto potenciador de la salida de potasio exige concentraciones bajas del ion Ca^{2+}. A concentraciones mayores, con el Ca^{2+} unido a la taza de Ca^{2+} en la subunidad α, el estradiol no modifica la actividad del canal.



3. TONO VASCULAR Y CANALES MAXI-K. La contracción muscular está acoplada al aumento generalizado del Ca^{2+} en todas las regiones de la célula muscular. El músculo liso vascular presenta una contracción basal (*b*), producto de las oscilaciones del potencial de membrana; cuando éste se acerca a potenciales menos negativos (despolarización), se activa la entrada de Ca^{2+} a través de los canales de Ca^{2+} del tipo L (*a*); cuando se hace más negativo (hiperpolarización), se cierran los canales L (*c*). El potencial de membrana depende, a su vez, de la presencia de pequeñas liberaciones de Ca^{2+}, desde el retículo sarcoplásmico (RS) hacia las cercanías de la membrana plasmática (*b*1 y *c*1), a través de los receptores del alcaloide ryanodina (RRy). Estos pulsos de calcio, aunque insuficientes para provocar la contracción del músculo, activan los canales de potasio del tipo Maxi-K (*b*2 y *c*2), promoviendo una hiperpolarización de la membrana del músculo y el cierre progresivo (*b*3) de los canales L hasta conseguir su cierre total (*c*3). La activación del Maxi-K por la despolarización y la entrada de Ca^{2+} se integra en el circuito de retroalimentación negativa que interviene en el cese de la contracción. Los canales Maxi-K en el músculo y otros tipos celulares vinculan así la homeostasis del calcio con la excitabilidad celular. El estado de contracción basal se puede desplazar hacia una relajación muscular, bien por incrementos de los pulsos de calcio o por activación directa de los canales de potasio (*c*0), o hacia una mayor contracción por la inhibición de la actividad de los canales de potasio (*a*1).

MIGUEL A. VALVERDE, FRANCISCO MUÑOZ Y RAMON LATORRE

presentaban una disminución de la concentración sérica de lipoproteínas de baja densidad (LDL), así como un aumento de las lipoproteínas de alta densidad (HDL). Ambos tipos de proteínas se encargan del transporte del colesterol y otros lípidos a través del organismo.

Las LDL transportan gran cantidad de colesterol. Tras ser captadas en el hígado, el colesterol se metaboliza en ácidos y sales biliares, que terminan siendo excretados. Las LDL que no se capturan en el hígado se acumulan en diferentes tejidos, como los vasos sanguíneos, y predispondrán al desarrollo de arteriosclerosis. Las lipoproteínas HDL, aunque transportan menos colesterol, retiran el colesterol de los tejidos periféricos.

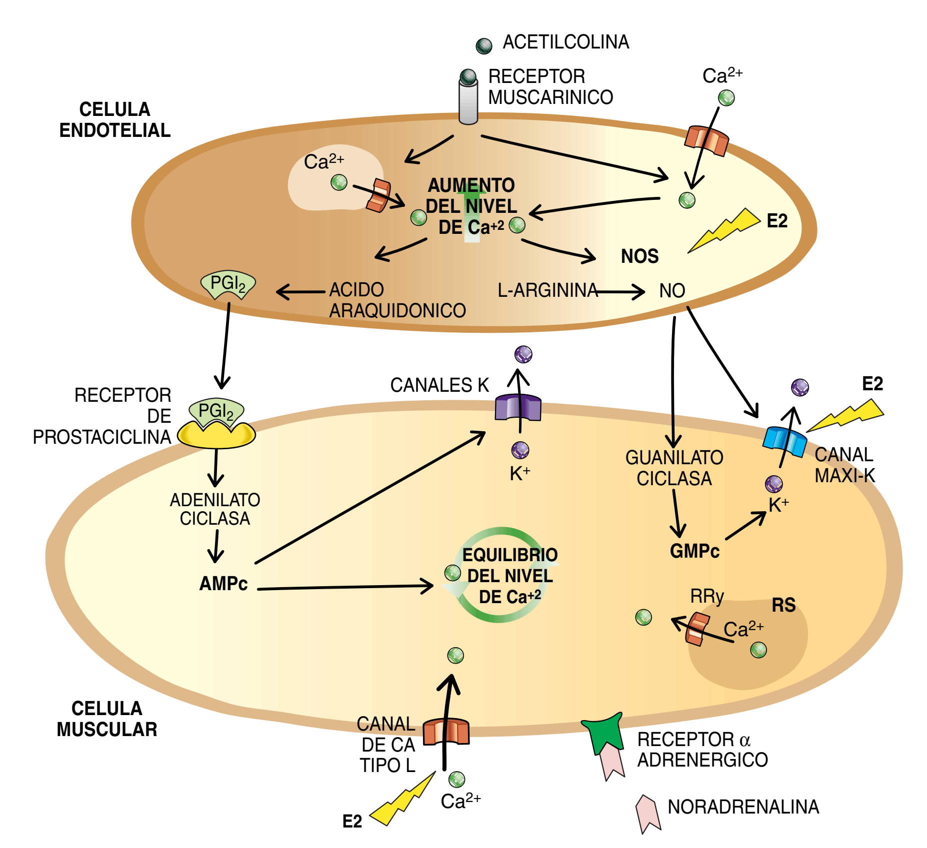
Se observan también cambios inducidos por los estrógenos en las lipoproteínas séricas cuando el es-

tradiol se combina con un progestágeno. De semejante combinación de hormonas esteroideas resulta una menor efectividad, si bien disminuye significativamente el riesgo de alteraciones proliferativas del endometrio.

Aunque queda mucho por averiguar sobre los mecanismos de acción de los estrógenos que dan lugar a variaciones en los niveles de las lipoproteínas séricas, se supone que podrían estar relacionados con cambios en la expresión de los genes hepáticos que cifran las apoproteínas configuradoras de las lipoproteínas. Esa vinculación es coherente con la observación de que el efecto de los estrógenos sobre las lipoproteínas depende de su vía de administración, no siendo efectiva la subcutánea, pero sí la oral, a través de la cual la hormona alcanza el hígado antes de que se produzca degradación alguna.

Entre otros factores modulados por los estrógenos sobresalen varios elementos propios de la respuesta hemostática. Muchos de los genes que controlan la producción de elementos hemostásicos se encuentran en el hígado, regulados por estrógenos. El tratamiento continuado con estrógenos reduce la concentración de fibrinógeno y factor VII, elementos importantes del proceso de coagulación. Por el contrario, la administración oral de estrógenos disminuye los niveles de factores que previenen la fibrinolisis, la degradación del coágulo ya constituido.

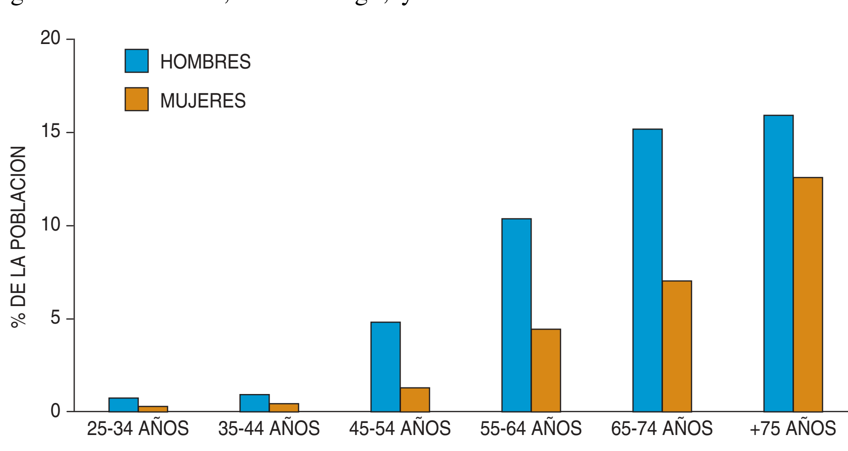
La acción combinada de los estrógenos determina la disminución de fenómenos trombóticos, esto es, reduce la formación de coágulos sanguíneos anormales; sin embargo, y para fomentar nuestra confusión, algún estudio epidemiológicos apunta a que las pacientes bajo terapia de reemplazo hormonal (TRH) presentan mayores riesgos de sufrir episodios de trombosis.



4. INTERACCION ENTRE EL ENDOTELIO y el músculo liso vascular. El endotelio genera sustancias vasodilatadoras, la prostaciclina (PGI_2) y el NO, en respuesta a agonistas vasodilatadores (la acetilcolina) que elevan el calcio intracelular en la célula endotelial. La PGI_2 y el NO pasan a la célula muscular y generan un aumento de AMPc y GMPc, mediadores intracelulares que, a su vez, modulan diferentes dianas celulares (entre ellas canales iónicos de potasio) resultando en una disminución del Ca^{2+} intracelular y, consiguientemente, la relajación muscular. La noradrenalina y otros agonistas vasoconstrictores ejercen su acción directa sobre el músculo y promueven la entrada de Ca^{2+} a través de los canales tipo L, así como la liberación desde el RS. Las marcas amarillas señalan diferentes dianas del estradiol (E_2)

Por último, los estrógenos parecen también ejercer un efecto sobre la homocisteína y otros factores considerados de riesgo para el desarrollo de enfermedades vasculares. La homocisteína, un derivado del aminoácido metionina, puede inducir lesión vascular y, por tanto, aumentar el riesgo de desarrollar un proceso trombótico.

Los efectos locales de los estrógenos se circunscriben a su acción sobre el endotelio y las fibras musculares lisas de las paredes vasculares. Se reducen a dos grupos principa-



5. PREVALENCIA de la enfermedad isquémica coronaria, en la población de los Estados Unidos en el período 1988-1994.

MIGUEL A. VALVERDE, FRANCISCO MUÑOZ Y RAMON LATORRE

Neuroprotección por estrógenos en la enfermedad de Alzheimer

Se han depositado grandes esperanzas en los estrógenos como neuroprotectores para la prevención y tratamiento de la enfermedad de Alzheimer (EA). Los datos epidemiológicos demuestran que las mujeres sometidas a terapia de reemplazo hormonal (TRH) presentan menos riesgo de padecerla; otros estudios proponen que los estrógenos producen una mejoría o al menos una desaceleración en la progresión de la enfermedad.

Son múltiples los efectos biológicos mediados por los estrógenos que avalan la asociación entre TRH y EA. En primer lugar, los estrógenos actuarían en el origen de la enfermedad de Alzheimer disminuyendo significativamente la liberación del péptido β-amiloide (Aβ); éste, al agregarse, forma las placas seniles que producen la neurodegeneración característica de la patología.

La capacidad del 17β-estradiol (E_2) de reducir la formación de Aβ soluble sugiere un efecto modulador sobre las enzimas involucradas en el procesamiento del Aβ (secretasas y presenilinas). Además, estas hormonas intervendrían en el desarrollo de la enfermedad inhibiendo alguno de los principales mecanismos de neurotoxicidad propuestos para el Aβ, entre los que destaca el estrés oxidativo.

El E_2 ejerce una potente acción antioxidante radicada en la presencia de un grupo hidroxilo en el anillo aromático mesomérico. Además, inhibe la unión de fibras de Aβ a los receptores nicotínicos α7, cuya inactivación se ha relacionado con la degeneración de las vías colinérgicas que caracteriza a la enfermedad de Alzheimer. El E_2 también estabiliza la homeostasis del Ca^{2+}, ion implicado en el inicio de la muerte neuronal, por inhibición de la lipoperoxidación de las membranas o por mecanismos que pueden recordar a los utilizados por la hormona en el sistema vascular, esto es, la modulación de los canales iónicos que intervienen en la homeostasis del Ca^{2+}.

Por último, los estrógenos aumentan la síntesis de acetilcolina y favorecen el mantenimiento de la supervivencia neuronal. De ese modo, mejoraría el déficit colinérgico característico de enfermedad de Alzheimer.

les: inducción de la dilatación de la pared vascular y remodelación de la misma. En el primer caso puede darse una potenciación de los mecanismos vasodilatadores o bien una disminución de los vasoconstrictores.

La interacción entre estrógenos y pared vascular se describió ya a principios de los años sesenta del siglo pasado. Se observó entonces la acumulación de estradiol en las paredes vasculares de pacientes terminales inyectados con estrógenos. Sabemos ahora que las células endoteliales y las musculares presentan receptores de estrógenos (RE) del tipo α y β. Aunque no todas, muchas funciones vasculares de los estrógenos están asociadas a la activación de estos receptores.

Vasodilatación y endotelio

Los estrógenos favorecen la vasodilatación a través de la potenciación de la vía del NO. ¿Cómo? De tres formas principales. Aumentan la producción y liberación del NO en respuesta a la acetilcolina, activan la óxido nítrico sintasa y reducen los peróxidos de lípidos, agentes que inactivan el NO.

La biodisponibilidad del NO por los estrógenos puede tardar más de dos días en obtenerse, a raíz del incremento de la expresión del gen de la NO sintasa, o producirse de forma rápida —no genómica— mediante su unión a receptores de estrógenos presentes en la membrana celular endotelial.

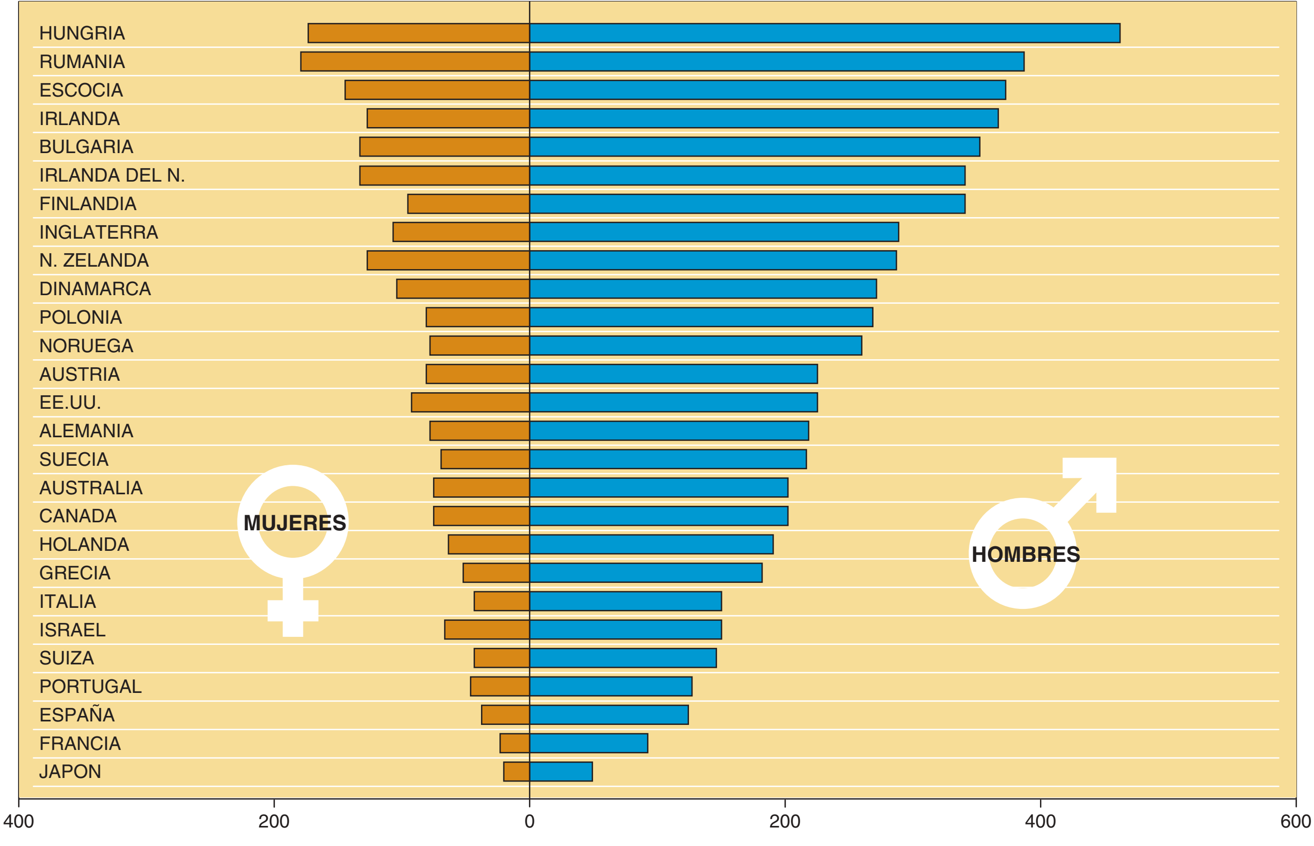
Según parece, la biodisponibilidad del NO de las hembras difiere de la de los machos; aquéllas, especie humana incluida, serían más sensibles a la acción de los estrógenos. Se ha comprobado que el efecto vasodilatador de los estrógenos dependiente del endotelio, mediado por el NO, ocurre a concentraciones fisiológicas de 17β-estradiol (entre 10^{-10} y 10^{-7} M) y es exclusivo para los vasos de las hembras.

Los estrógenos también modulan el tono vascular mediante la disminución de los niveles circulantes de sustancias vasoconstrictoras producidas por el endotelio y la estimulación de la síntesis de sustancias vasodilatadoras.

Los estrógenos y el músculo liso vascular

El efecto final de toda sustancia vasoactiva es la modulación de las propiedades eléctricas, mecánicas o ambas de las fibras musculares de la pared vascular. Mientras que la vasodilatación inducida por los estrógenos y dependiente del endotelio requiere la difusión de NO desde el endotelio hacia la fibra muscular, los estrógenos pueden también modificar, sin la participación del endotelio, la excitabilidad del músculo vascular, aunque a concentraciones suprafisiológicas de estradiol.

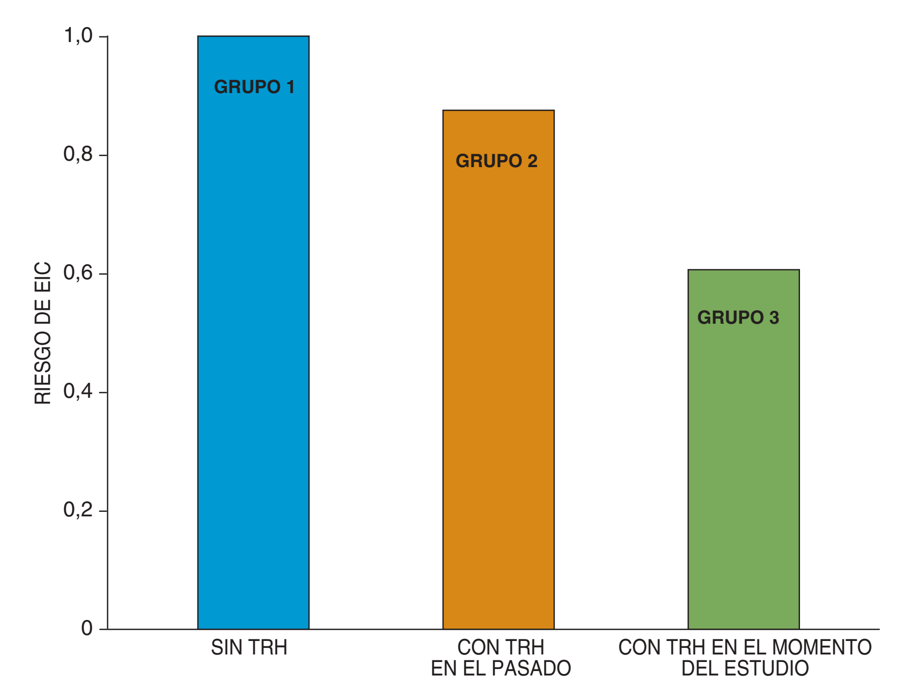
Desde mediados de los años noventa, nuestro laboratorio de la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona viene investigando los mecanismos por los cuales los estrógenos modulan la excitabilidad y, por tanto, la contracción de las fibras musculares. Estudiábamos entonces los efectos rápidos —no genómicos— de los estrógenos sobre los canales de iones. Buscábamos desentrañar los mecanismos por los cuales los estrógenos modulan la excitabilidad de las fibras musculares en ausencia de



6. MUERTES por 100.000 habitantes debidas a la enfermedad isquémica coronaria en diferentes países.

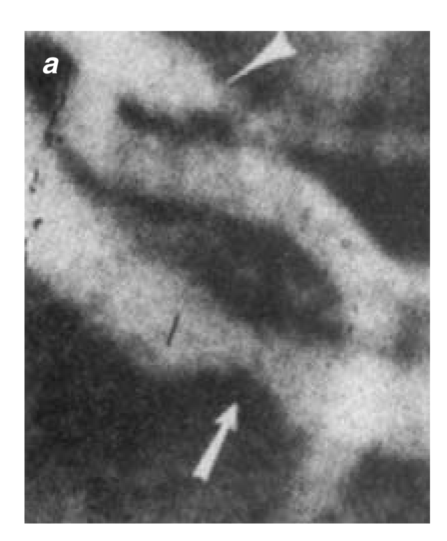
vasodilatadores endoteliales. Se suponía en aquellas fechas que los estrógenos generarían dentro de la fibra muscular, por un mecanismo desconocido, mensajeros intracelulares posiblemente del tipo de los nucleótidos cíclicos, como el guanosin-monofosfato (GMPc) o el adenosin-monofosfato (AMPc) que regularían los canales de iones. Dichos mensajeros intracelulares se habían asociado ya a algunos de los mecanismos de acción alternativos descritos para los estrógenos en otros tipos celulares.

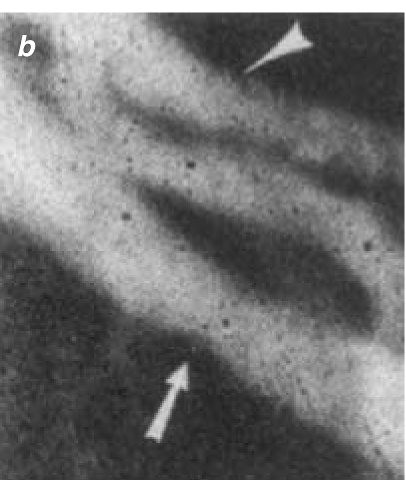
Pero la hipótesis no explicaba ciertas observaciones experimentales; por ejemplo que el 17α-estradiol, esteroisómero inactivo del estradiol, inducía la dilatación vascular, aunque en menor grado que el 17β-estradiol. Nuestros estudios iniciales nos llevaron a identificar varias vías por las cuales el estradiol modularía la contracción en la misma fibra muscular. Entre ellas, la activación de canales de potasio o la inhibición de



7. COMPARACION del riesgo de enfermedad isquémica coronaria (EIC). Al primer grupo compuesto por las participantes que nunca han recibido terapia de reemplazo hormonal (TRH) se les asigna un valor de riesgo 1 y se compara con las que han recibido TRH en el pasado (grupo 2), pero no en el momento de calcular el factor de riesgo, y con las que recibían TRH en el momento de calcular el factor de riesgo (grupo 3). Según este estudio, las mujeres que han recibido TRH presentan un menor riesgo de desarrollar EIC. Graficado a partir de resultados obtenidos por F. Grodstein y colaboradores.

MIGUEL A. VALVERDE, FRANCISCO MUÑOZ Y RAMON LATORRE





8. ANGIOGRAFIA CORONARIA en un paciente con arteriosclerosis. En la parte superior se muestra una angiografía de las arterias coronarias en un paciente con arteriosclerosis y después de dos años bajo terapia intensiva de disminución de lípidos (*panel inferior*). Obsérvese el estrechamiento de las arterias en los puntos indicados por las flechas y la gran recuperación tras el tratamiento.

MIGUEL A. VALVERDE, FRANCISCO MUÑOZ Y RAMON LATORRE

los canales de iones calcio. Ambos procesos disminuyen la entrada de Ca^{2+} en el músculo y, por tanto, su contracción. Observamos, asimismo, que algunos de estos efectos podían mimetizarlos sustancias con estructuras químicas semejantes al estrógeno, como el antiestrógeno ICI 180, o sustancias que, aunque estructuralmente distintas, presentan actividad estrogénica.

Comenzó a madurar la hipótesis según la cual el proceso modulador podría desarrollarse sin necesidad de la producción de segundos mensajeros. La demostración de esta hipótesis de trabajo vio la luz en 1999, tras la colaboración iniciada entre los laboratorios de dos de los autores (Latorre y Valverde). El esfuerzo conjunto permitió identificar la subunidad β que forma parte del canal de potasio Maxi-K como el sitio de unión del estrógeno, cuya unión determina el incremento de la salida de iones potasio a través de la subunidad α.

El hallazgo sacaba a la luz el mecanismo molecular por el cual los estrógenos (el 17β-estradiol y el 17α-estradiol) activan el canal de potasio en el músculo vascular. Aportó, además, la primera descripción de la unión de los estrógenos a un canal iónico activado por cambios en el potencial de membrana.

Angiogénesis y proliferación vascular

Los estrógenos parecen ejercer efectos protectores ante las lesiones vasculares. Por una parte, aceleran el crecimiento endotelial posiblemente mediante el incremento de la producción de determinadas proteínas. Por otra, inhiben la proliferación muscular, de un modo directo o a través del aumento de la liberación de NO.

Desde un principio, el mecanismo por el cual los estrógenos remodelan la pared vascular tras una lesión se ha venido asociando a la unión de los estrógenos a su receptor. Sin embargo, en estudios recientes dirigidos por Michael Mendelsohn y Richard Karas, de la Universidad de Tufts, en los que se utilizaron ratones genéticamente modificados —sin receptores—, se observó que los estrógenos no perdían su capacidad de reducir la lesión vascular.

Estrógenos y enfermedades coronarias

La enfermedad isquémica coronaria (EIC) representa un desequilibrio entre la aportación de oxígeno y otros nutrientes y la demanda del músculo cardíaco, el miocardio. De las múltiples formas de esa cardiopatía isquémica, la más frecuente es la EIC asociada a la deposición de placas ateromatosas en las arterias coronarias, con reducción consiguiente del flujo sanguíneo.

La placa ateromatosa consiste en un deposito de lípidos, principalmente colesterol. En estados avanzados puede darse una hipertrofia muscular de la pared vascular y tejido fibrótico con lesión del tejido endotelial. A veces, la placa ateromatosa contiene depósitos de Ca^{2+} precipitado, lo que determina el endurecimiento de la pared vascular y la arteriosclerosis. Tal cuadro puede empeorar con cambios en el tono del músculo que forma la pared vascular. Una contracción muscular excesiva puede obstruir la arteria parcialmente obliterada por una placa ateromatosa o restringir el flujo sanguíneo en una arteria sana.

En los países industrializados las enfermedades cardiovasculares son la causa más frecuente de muerte en las mujeres. Añádase que casi un 40 % de las mujeres entre los 55 y 65 años con EIC presentan discapacidad asociada a su enfermedad cardíaca. Pero la incidencia de EIC en mujeres premenopáusicas disminuye drásticamente. En un estudio clásico de Kalin y Zumoff, publicado en 1987, ya se apuntó una mayor prevalencia de mortalidad por EIC en varones respecto a mujeres, independientemente del país de origen. Este hecho, junto con la observación de que las mujeres que sufren una menopausia precoz o son sometidas a intervenciones quirúrgicas con extirpación de los ovarios, veían aumentada la presencia de EIC permitió establecer la hipótesis de que los estrógenos podrían ser el factor cardioprotector presente en las mujeres durante su etapa reproductora, que desaparece tras alcanzar la menopausia.

Los autores

MIGUEL A. VALVERDE, FRANCISCO MUÑOZ y RAMON LATORRE se interesan por el tema desarrollado en el artículo desde hace años. Valverde, pionero en el estudio de la interacción entre hormonas y canales de iones, enseña fisiología en la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona, donde profesa también Muñoz. Latorre es profesor de biofísica en el Centro de Estudios Científicos de Valdivia en Chile.

Otros estudios epidemiológicos han aportado pruebas adicionales de la asociación entre los estrógenos y la EIC. Abundan los que defienden que el uso de estrógenos como terapia de reemplazo hormonal (TRH) reduce el riesgo de padecer EIC en mujeres posmenopáusicas sanas. Sin embargo, estos estudios no están exentos de controversia.

Se ha argumentado que las personas que deciden someterse a un régimen de TRH suelen proceder de un nivel social elevado y disponen de mejor atención sanitaria. Es cierto que la prevalencia de EIC está relacionada con el estilo de vida. La dieta equilibrada, baja en colesterol, el ejercicio físico y la disminución en el consumo de tabaco son factores determinantes en la reducción de la incidencia de EIC. Sin embargo, aun teniendo en cuenta estos factores, numerosos estudios muestran una asociación entre TRH y menor riesgo de padecer EIC resultando en los cambios beneficiosos en el perfil lipídico: disminución de la LDL, aumento de la HDL y del flujo sanguíneo. Estos estudios concluyen que: 1) la TRH sólo es beneficiosa para las mujeres que comienzan dicha terapia inmediatamente después de entrar en menopausia y que aún no presentan cardiopatías y 2) la principal indicación de la TRH sigue siendo la mejora de la calidad de vida de la mujer menopáusica.

Con la TRH desaparecen los sofocos, palpitaciones y prurito vaginal y otras molestias, sin olvidar el efecto beneficioso que supone la protección frente a la osteoporosis (la desmineralización y consiguiente debilitamiento del hueso). Otro aspecto importante en la decisión de iniciar o no la TRH es el aumento del riesgo de padecer cáncer de mama y útero. Aunque los estrógenos muy probablemente no desencadenan los cambios celulares que marcan el inicio de un tumor, estimulan el crecimiento de las células que han comenzado a proliferar de forma descontrolada.

El estudio de los efectos de los estrógenos sobre el sistema vascular ha presentado un desarrollo vertiginoso durante los últimos años con nuevos y espectaculares avances en la identificación molecular de los mecanismos de acción de los estrógenos, además de llamar la atención de la sociedad y las autoridades sanitarias sobre la necesidad de evaluar críticamente el efecto de la TRH. En este sentido es importante señalar que el último gran ensayo de prevención con TRH, llevado a cabo por el Instituto Nacional de la Salud de los Estados Unidos, se ha suspendido prematuramente al encontrar un aumento del riesgo de patología cardiovascular y cáncer de mama en las mujeres con TRH. El anuncio de su suspensión se ha hecho público a mediados de julio de 2002 y, aunque el aumento del riesgo absoluto para una mujer que tome TRH combinada (estrógeno/progestágeno) no es marcado, se recomienda no prescribirlo de forma crónica, pues el riesgo aumenta con el tiempo. De nuevo se abre un viejo debate: ¿Cómo explicar la discrepancia entre los estudios epidemiológicos negativos y los datos experimentales que señalan un efecto beneficioso de los estrógenos? ¿Cómo aprovechar nuestro conocimiento de los mecanismos moleculares de los estrógenos para el desarrollo de nuevas moléculas que mimeticen los efectos beneficiosos, pero que carezcan de sus efectos adversos?

Bibliografía complementaria

HORMONAS ESTEROIDEAS, TRANSDUCCIÓN DE SEÑALES, EXPRESIÓN GÉNICA Y CÁNCER GINECOLÓGICO. Miguel Beato en *Medicina Clínica*, n.º 112, págs. 745-754; Barcelona, 1999.

A PROSPECTIVE, OBSERVATIONAL STUDY OF POSTMENOPAUSAL HORMONE THERAPY AND PRIMARY PREVENTION OF CARDIOVASCULAR DISEASE. F. Grodstein, J. E. Manson, G. A. Colditz, W. C. Willett, F. E. Speizer y M. J. Stampfer en *Annals Intern. Medicine*, n.º 133, pág. 933-941; 2000.

THE ESTROGEN TRINITY: MEMBRANE, CYTOSOLIC AND NUCLEAR EFFECTS. A. Nadal, M. Díaz y M. A. Valverde en *News in Physiological Sciences*, vol. 16, págs. 251-255; 2001.

RISKS AND BENEFITS OF ESTROGEN PLUS PROGESTIN IN HEALTHY POSTMENOPAUSAL WOMEN. Writing group for WHI en *J. Am. Medical Association*, vol. 288, págs. 321-333; 2002.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

Repartir escasez

Alicia y Bruno están de enhorabuena. Un tío lejano les ha declarado herederos únicos en su testamento. En él indica que Alicia debe recibir 120.000 euros y Bruno 40.000. Pero pronto se descubre que su patrimonio asciende sólo a 100.000 euros. El albacea les propone que el reparto se haga de modo proporcional. El deseo del tío es que Alicia reciba el triple que Bruno. Por tanto, lo más correcto es dar 75.000 a Alicia y 25.000 a Bruno. De este modo se respeta escrupulosamente la proporción 3 a 1.

Sin embargo, el astuto abogado de Alicia no está conforme: la pérdida total de los dos herederos, es decir, la diferencia entre lo que esperaban recibir y lo que van a recibir realmente, es de 60.000 euros. Lo más justo sería repartir esta pérdida por igual: que cada uno pierda 30.000 euros con respecto a lo testado. Siguiendo este criterio, Alicia debe recibir 90.000 euros y Bruno 10.000. El albacea está ahora bastante confundido. ¿Cuál de las dos propuestas es la más justa?

En matemáticas, a este problema se le conoce como el "de la bancarrota" y, aunque parezca simple, varios grupos de investigación trabajan en la actualidad sobre él. Se denomina así porque aparece también cuando una empresa quiebra y el total de su patrimonio es inferior a su deuda. ¿Cómo repartir el patrimonio entre los distintos acreedores, de modo proporcional a su deuda o de modo que pierdan todos la misma cantidad de dinero?

El problema, en su formulación más general, es el siguiente: se tiene que repartir una cantidad X entre N individuos, cada uno reclama una cantidad c_i y la suma de todas las cantidades reclamadas $C = c_1 + + c_2 + \ldots + c_{N-1} + c_N$ es mayor que la cantidad disponible X. Hay que encontrar una regla para repartir X entre los N individuos, es decir, asignar una cantidad x_i a cada individuo i de forma que la suma sea X.

La regla propuesta por el albacea se denomina *regla proporcional* y consiste en asignar:

$$x_i = \lambda c_i \text{ siendo } \lambda = \frac{X}{C} < 1$$

La regla propuesta por el abogado de Alicia se llama *regla de pérdidas iguales* y prescribe la asignación:

$$x_i = \max\{0, c_i - l\}$$

en donde l se calcula de modo que la suma de las asignaciones x_i sea igual a X. Con esta regla, las pérdidas de los reclamantes son todas iguales a l, salvo para los que reclaman una cantidad tan pequeña que diera una asignación negativa al restarle l.

Una tercera regla es la *regla de ganancias iguales,* que reparte el total X por igual entre todos los individuos, siempre que ninguno reciba más de lo que reclama. Matemáticamente se escribe así:

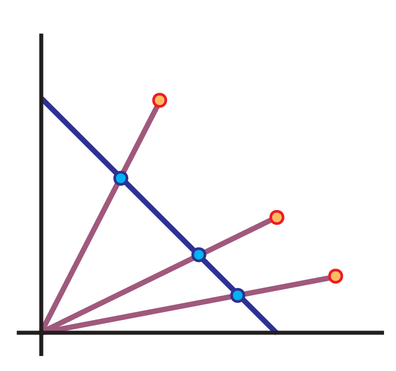
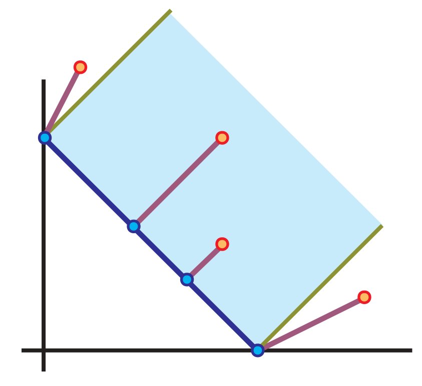
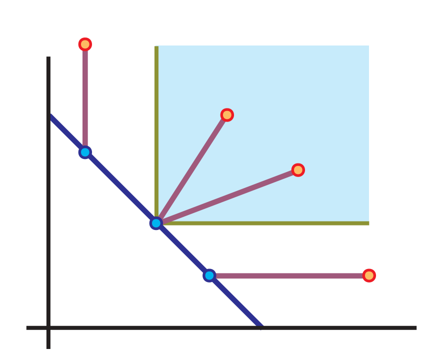
$$x_i = \min\{c_i, r\}$$

en donde r se calcula imponiendo que la suma de las asignaciones x_i sea igual a X.

Cuando se trata de sólo dos individuos, el problema tiene una interpretación geométrica sencilla. El par $c = (c_1, c_2)$ es un punto en el plano, que se dibuja en color naranja en las gráficas de la figura 1; mientras que las posibles soluciones $x = (x_1, x_2)$, tales que $x_1 + + x_2 = X$, forman una recta inclinada, que se ha dibujado en azul. Una regla es entonces un modo de asignar a un punto c un punto x (*celeste en la figura 1*) en la recta de posibles soluciones. Por ello, Antonio Villar, matemático de la Universidad de Alicante que trabaja en el problema de la bancarrota, suele referirse a él como "la historia de un punto y una recta".

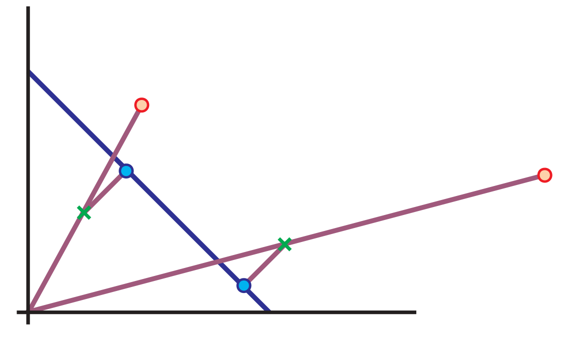
En las tres gráficas de la figura 1 vemos cómo actúan cada una de las tres reglas anteriores. Para la regla

1. Las tres reglas descritas en el texto. De izquierda a derecha: la regla proporcional, la de pérdidas iguales y la de ganancias iguales. En todas las gráficas los puntos de reclamaciones son los naranjas y los de asignaciones los azules

proporcional se traza una recta que une el origen de coordenadas con el punto c. El punto x es la intersección entre esta recta y la recta de posibles soluciones. En la regla de pérdidas iguales, x es el punto de la recta de posibles soluciones más cercano a c, lo cual parecería indicar que esta regla es incluso más justa que la proporcional. Finalmente, la regla de ganancias iguales elige el punto medio de la recta de posibles soluciones siempre que c esté en la región sombreada. Cuando c está fuera de esa región, la regla asigna el punto de la recta de soluciones que está en la misma vertical u horizontal de c, tal y como muestra la figura 1.

Cada una de estas reglas tiene una larga historia. La proporcional fue descrita por Aristóteles, mientras que las de pérdidas y ganancias iguales se encuentran en los códigos de Maimónides del siglo XII. Es fácil comprobar que la regla de pérdidas iguales favorece a los grandes acreedores porque excluye del reparto a los individuos que reclaman cantidades pequeñas. Por el contrario, la de ganancias iguales favorece a los acreedores pequeños, ya que éstos consiguen el total de lo reclamado. Esta regla se aplica en situaciones reales, como la bancarrota de intermediarios financieros, en donde se saldan primero las deudas contraídas con los clientes pequeños, por dos razones: porque suelen ser los menos pudientes y a los que más afecta no cobrar la deuda y, en segundo lugar, porque no pueden considerarse responsables de la bancarrota, ya que si los N deudores reclamaran cantidades inferiores a X/N ésta no se habría producido.



2. Representación de la regla del Talmud. La cruz verde es el punto medio entre el origen y el punto c *de reclamaciones. El punto* x *de asignación es el más cercano de la recta azul a la cruz verde*

A estas tres reglas se añade una cuarta un poco más complicada. Surgió de considerar el problema de la bancarrota como un problema de teoría de juegos, pero se ha demostrado posteriormente que coincide con las prescripciones que da el Talmud para distintos casos particulares. De modo que la regla es tan antigua como las tres anteriores. La regla del Talmud (también llamada *nucleolo*) es una sutil combinación de la de pérdidas iguales y ganancias iguales. Consiste en dividir por la mitad el total de reclamaciones. Si $C/2$ es mayor que el capital a repartir X, entonces se aplica la regla de pérdidas iguales pero considerando sólo la mitad de la reclamación de cada individuo. Si $C/2$ es mayor que X, entonces se reparte X satisfaciendo la mitad de la reclamación de cada individuo y el resto se reparte según la regla de ganancias iguales. Matemáticamente se escribe así:

$$x_i = \begin{cases} \text{mín}\{c_i/2, r\} \text{ si } X \leq C/2 \\ c_i/2 + \text{máx}\{0, c_i/2 - l\} \text{ si } X \geq C/2 \end{cases}$$

Los valores de r y l se escogen, en cada caso y al igual que en las reglas anteriores, de modo que la suma de asignaciones sea igual a X. La representación gráfica de la regla del Talmud se muestra para un par de ejemplos en la figura 2: se traza una línea entre el origen y c y se marca el punto medio de la misma; a partir de este punto, se busca el más cercano de la recta de soluciones posibles, siempre que las asignaciones sean positivas y menores que las reclamaciones. Como afirman Carmen Herrero y Antonio Villar, la regla del Talmud parece basarse en el principio psicológico "más de la mitad es prácticamente el todo, mientras que menos de la mitad es prácticamente nada". Así, la regla trata de satisfacer la mitad de las reclamaciones, al menos para los acreedores pequeños.

En la herencia de Alicia y Bruno, la regla del Talmud se aplicaría de la siguiente forma. Las reclamaciones de los dos herederos son 120.000 y 40.000 euros, respectivamente. La mitad de la reclamación total es por tanto 80.000 euros, menos que el capital a repartir, $X = 100.000$ euros. Por tanto, repartimos 80.000 euros, dando 60.000 a Alicia y 20.000 a Bruno. Los 20.000 restantes los repartimos mediante la regla de ganancias iguales entre los dos herederos, que ahora reclaman 60.000 y 20.000 euros, respectivamente. Damos, por lo tanto, 10.000 euros a cada uno. En total, Alicia habrá recibido 70.000 euros y Bruno 30.000. Esta solución difiere de las anteriores. En nuestro problema de la herencia, cada regla establece asignaciones diferentes: la proporcional da 75.000 euros a Alicia y 25.000 a Bruno, la de pérdidas iguales 90.000 y 10.000, la de ganancias iguales 60.000 y 40.000, mientras que el reparto con la regla del Talmud sería de 70.000 y 30.000. ¿Cuál es la correcta? No hay una respuesta definitiva. El trabajo del grupo de Antonio Villar y de otros matemáticos trata de encontrar las propiedades básicas de cada una de las reglas que hemos descrito. Lo importante es conocer la variedad de reglas y qué propiedades las caracterizan. De este modo podremos saber cuál es la más adecuada en cada caso. Un ejemplo de indudable importancia práctica es el trabajo de los economistas de la Universidad del País Vasco Carmen Gallastegui, José Manuel Chamorro, Javier Fernández Macho y Elena Iñara, en el que consideran la asignación de cuotas de pesca a los países de la Unión Europea como un problema de bancarrota. En este caso, las reclamaciones serían las cantidades c_i pescadas por cada país en períodos en donde no había restricciones. El total C de estas reclamaciones excede a la cantidad X de pesca máxima que garantiza la sostenibilidad de los recursos pesqueros. El problema es entonces idéntico al de nuestra conflictiva herencia entre Alicia y Bruno y al de muchas otras situaciones en donde haya que repartir algún bien escaso.

Mark Fischetti

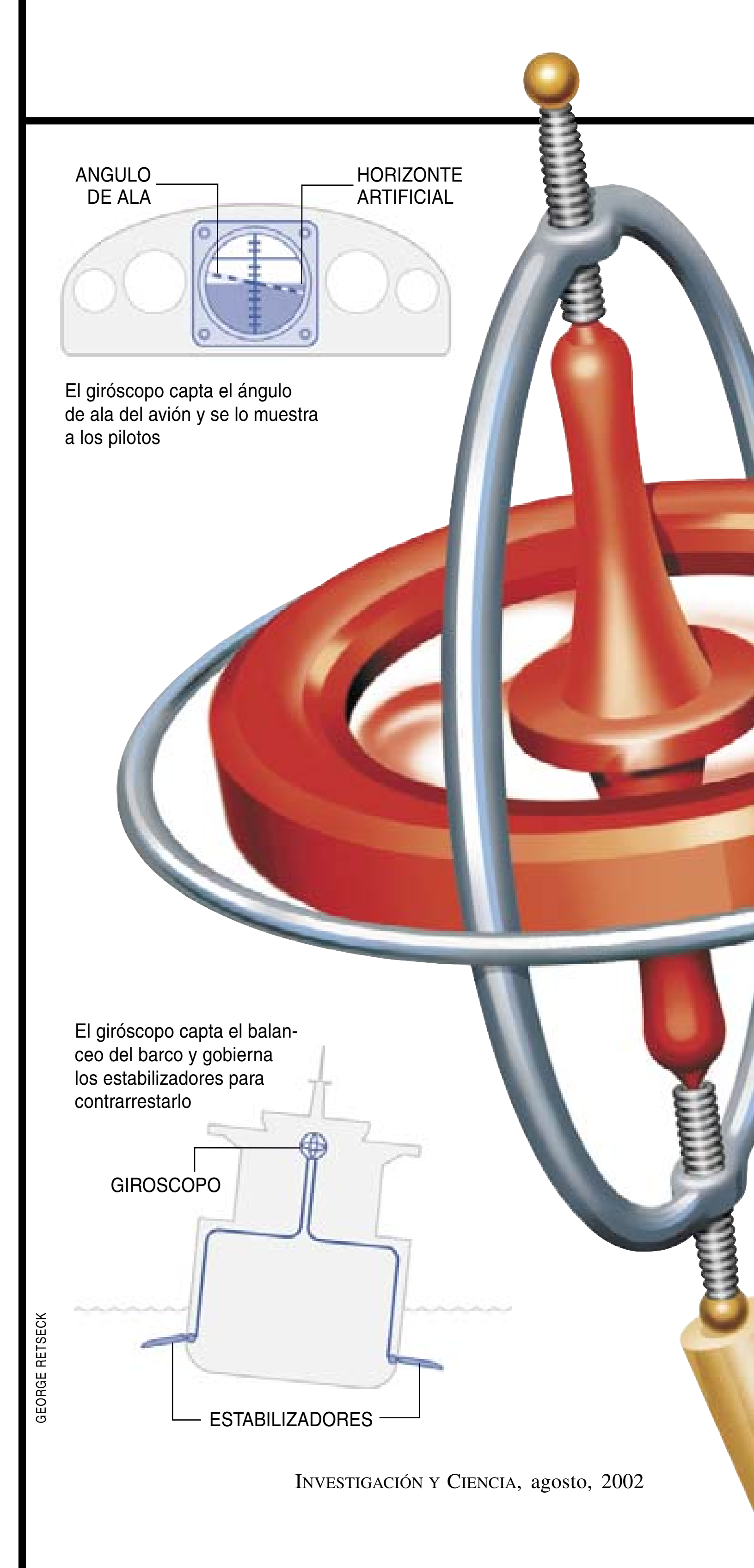
Guiado giroscópico

El americano Elmer Sperry, fundador en 1910 de la Sperry Gyroscope Company, inventó los primeros instrumentos giroscópicos prácticos. La empresa construyó estabilizadores de barcos y el "horizonte artificial" que informa a los pilotos de la actitud de su avión. Desde su muerte en 1930, una diversidad de empresas Sperry ha convertido sus casi 400 patentes en sistemas de guía y navegación automáticos de aviones militares, cohetes, bombas, satélites e ingenios espaciales. Los giróscopos modernos guían robots, en los automóviles sistemas antideslizantes y navegadores de salpicadero, los transbordadores espaciales, el telescopio espacial Hubble, el vehículo de exploración de la superficie de Marte y las mochilas propulsoras de los astronautas.

La utilidad de los giróscopos se basa en dos principios. Según la inercia giroscópica, una masa en rotación conserva una orientación fija en el espacio. Un giróscopo que gire mantendrá un satélite apuntando siempre hacia la Tierra; lo estabilizará y facilitará nuestra comunicación con él. Una masa en rotación resiste asimismo las fuerzas que intenten ladearla. A mediados del siglo XX se atornillaban a los cascos de los barcos enormes giróscopos que pesaban toneladas y rotaban impelidos por unos motores; "empujaban" contra las olas para mantener derechas las embarcaciones.

Según el principio de la precesión, un giróscopo en rotación libre se moverá en ángulo recto con respecto a una fuerza externa que se le aplique. Una peonza que gira sobre una mesa no se caerá si se la empuja; se moverá lateralmente con respecto al empuje. Un giróscopo instalado en un ala de un avión en vuelo horizontal precesionará cuando el ala se ladee; los instrumentos la captarán y mostrarán al piloto el ángulo de ala, crucial cuando no ve nada por el parabrisas. Un segundo giróscopo indicará el cabeceo del avión, de morro a cola. Conectados a unos acelerómetros que midan los cambios de velocidad, los giróscopos podrán encargarse del avión: en eso consiste el piloto automático.

Cada día hay menos giróscopos mecánicos. En los años ochenta, los superaron en precisión, pequeñez y ligereza los de láser anulares y los de fibra óptica, que se basan en los cambios de patrones de luz; ahora cuestan de 3000 a 4000 euros. Hay también giróscopos diminutos, construidos mediante el micromecanizado del cuarzo o del silicio, que captan los cambios en las vibraciones de los materiales. Son menos precisos, pero se fabrican en masa, como los circuitos integrados, y cuestan sólo 20 euros; están al alcance, pues, de los consumidores, para su aplicación en los automóviles, por ejemplo.



El giróscopo capta el ángulo de ala del avión y se lo muestra a los pilotos

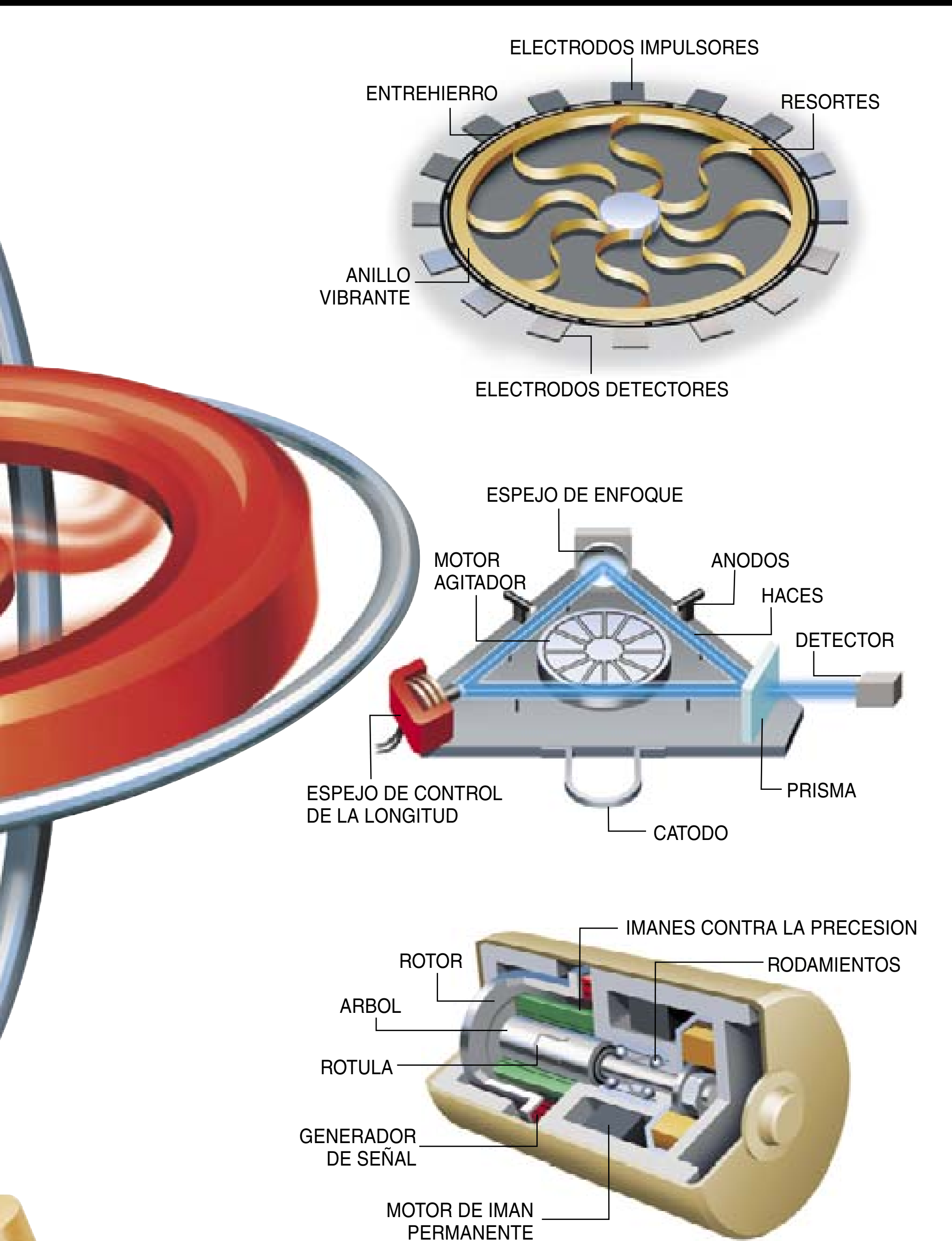
El giróscopo capta el balanceo del barco y gobierna los estabilizadores para contrarrestarlo

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **CUESTION DE GRADOS**. La precisión de los giróscopos varía. "El sesgo" causado por la fricción y los cambios térmicos es fundamental. Neil Barbour, experto en giróscopos del Laboratorio Charles Stark Draper, dice que los mejores aparatos mantienen una incertidumbre debida al sesgo inferior a 0,01 grado a la hora; ello significa que pueden guiar un proyectil a un blanco con un error menor que una milla náutica tras una hora de vuelo. Las bombas guiadas lanzadas sobre Afganistán tenían un sesgo del orden de 1 grado a la hora. El de los giróscopos de los sistemas antideslizantes llega a los 3600 grados a la hora, pero sirven porque actúan sólo durante unos pocos segundos, para corregir el movimiento del vehículo.

➤ **VUELO RASANTE.** En un concurso aéreo celebrado en París en 1919, Lawrence, hijo del inventor Elmer Sperry, hizo una demostración de su estabilizador giroscópico de aviones. Pilotaba un biplano; separadas las manos de los mandos, voló muy bajo, cerca de las tribunas de los jueces, mientras un mecánico caminaba por el ala del avión. Más tarde, padre e hijo idearon un "piloto automático", que ayudó a Wiley Post a efectuar el primer vuelo en solitario alrededor del mundo en 1933.

➤ **SIN CONTROL.** Las leyes estadounidenses prohíben la exportación de giróscopos de alta precisión. En 1999 se detuvo en Estados Unidos a un hombre de negocios chino acusado de tratar de comprar giróscopos de fibra óptica para guiar bombas "inteligentes". En 1995, unos buceadores de las Naciones Unidas encontraron unos giróscopos en el fondo del Tigris, cerca de Bagdad; siguieron la pista hasta un instituto militar soviético, ya clausurado, que construía sistemas de guiado para misiles balísticos.



MICROGIROSCOPO
El giróscopo micromecánico de anillo vibratorio de silicio creado por Farrokh Ayazi, del Instituto de Tecnología de Georgia, consiste en un anillo suspendido de unos resortes curvos, flotantes y sujetos a un pitón central fijo. Los electrodos impulsores aplican una fuerza electrostática al anillo y éste genera un patrón vibratorio estacionario que captan continuamente los electrodos detectores. Si una fuerza externa rota el anillo en torno a su eje, el patrón vibratorio se distorsionará de una manera que indicará la dirección de la rotación. La magnitud de la deformación dará la velocidad de giro.

GIROSCOPO DE LASER ANULAR
Dos ánodos y un cátodo excitan un gas atravesándolo en sentidos contrarios con dos ondas luminosas de la misma frecuencia. Si una fuerza exterior rota el anillo, una de las ondas viajará algo más. Un detector captará el consiguiente desajuste de frecuencias, que revelará la velocidad de rotación. Las ondas luminosas que entran en el detector crean un patrón de franjas; un cambio en éste muestra la dirección del giro. Para que los haces no se bloqueen en una única frecuencia, su tendencia natural, un motor agitador hace vibrar el instrumento y, así, se produce un leve cambio de fase.

GIROSCOPO SINTONIZADO DINAMICAMENTE
Un motor mantiene girando un rotor de hierro sobre unos rodamientos a una velocidad constante. Si una fuerza exterior rota el giróscopo, el rotor precesionará y los cambios del campo magnético en un generador de señal indicarán la dirección y la velocidad de la rotación. El generador dará, además, instrucciones a unos imanes para que contrarresten la precesión y el rotor no choque con la carcasa.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Wolfgang Bürger

Móvil perpetuo

Nada es gratis. ¿Quién ha visto un móvil perpetuo, un mecanismo automático que obtenga de la nada una cantidad inagotable de energía mecánica? Si visita al inventor de un aparato de este tipo, esté seguro de que no se lo va a enseñar, o de que, mire por dónde, lo tendrá en reparación justo en ese momento.

Antes de que se contase con una idea clara de qué es la energía, había quienes sabían que no era posible multiplicarla a placer. En 1686 Gottfried Wilhelm Leibniz introdujo el concepto de energía cinética bajo el nombre de *vis viva* ("fuerza viva"); los físicos franceses Jean Victor Poncelet (1788-1867) y Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843) definieron hacia 1826 el trabajo mecánico como el producto de la fuerza por el recorrido. Pero ya en el siglo XVI había dos grupos, el de quienes creían factibles y deseables los *móviles perpetuos*, y el de los críticos que afirmaban que eran imposibles y hasta absurdos. El matemático y físico holandés Simon Stevin (1548-1620) enunció en 1586 el principio de la "imposibilidad de crear fuerzas"; con él explicó por qué una cadena de bolas que se apoyase sobre dos planos de distinta inclinación (*véase la figura 1*) permanecería en equilibrio estático. Si las dos partes superiores de la cadena no estuviesen en equilibrio, el collar entero giraría hacia la izquierda o hacia la derecha hasta ocupar cada bola el sitio de la precedente, y así por toda la eternidad, porque se habría vuelto al estado de partida y se repetiría el razonamiento. El resultado sería un móvil perpetuo, un imposible, según el postulado inicial. Como la parte de la cadena que pende está, por simetría, en equilibrio mecánico, se puede prescindir de ella sin afectar al equilibrio del resto de la cadena.

Esta argumentación sólo es exacta para "infinitas bolas infinitamente pequeñas", esto es, para una distribución homogénea de masa a lo largo de la cadena. Pero Stevin no disponía todavía de estos conceptos infinitesimales. Si se hace abstracción de la parte que pende, el equilibrio del resto no será "estable": el menor desplazamiento hacia la derecha o hacia la izquierda hará que el trozo de cadena caiga al vacío.

1. "Dos pesos sobre dos lados inclinados de un triángulo están en equilibrio cuando guardan la misma relación que la longitud de los lados entre sí." Esta ilustración adorna la portada de Beghinselen der Weeghconst*, de Simon Stevin*

La idea del móvil perpetuo tiene su origen probablemente en el siglo XII, en la India; desde ahí llegó a Europa en el siglo XIII gracias a los árabes. Es muy probable que éstos, muy necesitados en sus países de mano de obra para el riego de los campos, buscasen, muy pragmáticamente, una manera de propulsar sus numerosos elevadores de agua. Los europeos medievales, según el historiador de la técnica Friedrich Klemm, perseguían una finalidad más ideal: un movimiento circular continuo como imagen terrestre del movimiento divino de las esferas celestes,

profanando “el pensamiento aristotélico, que reservaba los movimientos circulares eternos a los cielos”.

Los móviles perpetuos de la Edad Media eran en su mayoría, conforme al estado de la técnica por entonces, ruedas con barras giratorias o tubos en parte rellenos de mercurio. O sistemas de tubos donde fluía agua en circuito cerrado. Los inventores creían que podían conseguir un desequilibrio constante: las barras giratorias o los recipientes del líquido mantendrían siempre el baricentro de la rueda a un mismo lado del punto de giro, que descendería continuamente mientras la rueda girase. Si esto fuera posible, el mecanismo convertiría la energía potencial del campo gravitatorio en energía cinética y generaría sin cesar trabajo. Pero el baricentro de la rueda se alejará, como mucho, del centro de giro hasta donde le permitan las masas; además, después de una vuelta entera, si el mecanismo, conforme a la intención de quienes lo idearon, se encontrase de nuevo en la situación inicial, el baricentro volvería también a su altura original.

Si no las máquinas, sí se encuentran en movimiento perpetuo los pensamientos de sus inventores, inasequibles al desaliento hasta en nuestro ilustrado siglo. Todo los procesos físicos y químicos imaginables se han puesto al servicio de supuestos móviles perpetuos. Arthur W. J. G. Ord-Hume, constructor de aviones y autor de varios libros, habla de la “perpetuidad del inventor de movimientos perpetuos”.

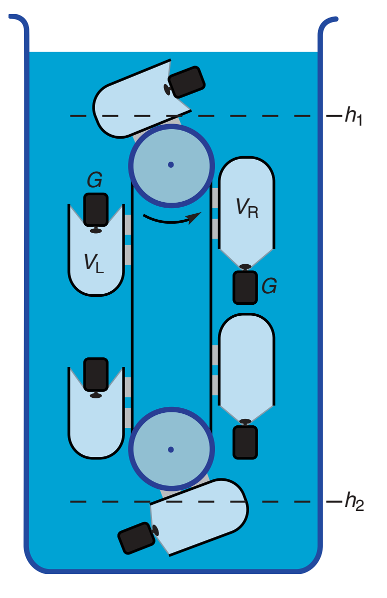
El número de ideas y de demostraciones que se presentaban ante las academias de las ciencias debía de ser hace más de doscientos años tan abrumador, que la Académie Royale des Sciences decidió en 1775 no aceptar ninguna supuesta solución más de determinados problemas: la duplicación del cubo con la ayuda sólo de un compás y una regla, la trisección del ángulo con esos mismos métodos de la geometría clásica y la construcción de una máquina en movimiento continuo. Que los dos primeros no son resolubles se ha podido demostrar matemáticamente. En cambio, cuando la Academia dice que la construcción de un móvil perpetuo es “absolutamente imposible” se basa “sólo” en un principio empírico; no está en la naturaleza de las cosas que se pueda demostrarlo. Por eso no desaparecerán en el futuro los descubridores de móviles perpetuos.

Conservación de la energía: Desde la formulación del principio de conservación de la energía (el primer principio de la termodinámica) en 1842 por Robert Julius Mayer, se denomina móvil perpetuo de primera especie a toda máquina hipotética que lo viole, es decir, que aporte trabajo sin tomar un equivalente de alguna fuente de energía; un artilugio así haría crecer la energía total del universo. (Un móvil perpetuo de segunda especie sería en cambio una máquina que, respetando el principio de conservación de la energía, convirtiese el movimiento molecular térmico en un movimiento mecánico ordenado sin crear un desorden correspondiente en otro lado; violaría el segundo principio de la termodinámica.) Si se pudieran construir tales artefactos, se dispondría de energía para la locomoción, la calefacción y la iluminación en cantidad ilimitada. Pero hay otra cara de la moneda: si existieran, serían peligrosos y habría que prohibirlos, por seguridad. En caso de que los consumidores no utilizaran en cada instante toda la potencia que produjesen las máquinas, éstas almacenarían en su movimiento o en su estructura el sobrante: se acelerarían y calentarían, y acabarían por fundirse o por explotar. No nos extrañemos de no encontrar móviles perpetuos: ¡si hubiesen existido alguna vez, ya habrían reventado hace tiempo por un exceso de energía!

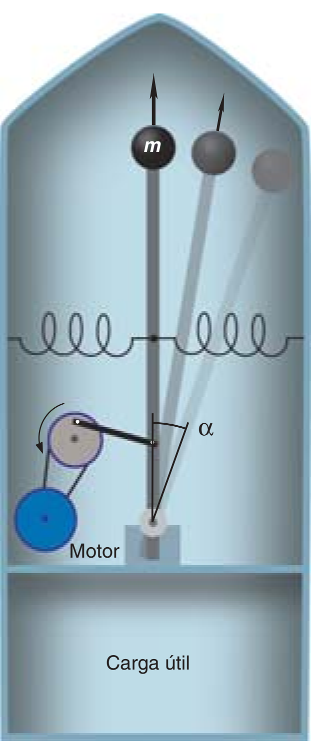
En lo que sigue voy a presentar tres construcciones típicas de móvil perpetuo y explicar “en la letra pequeña” por qué no pueden funcionar.

El motor ascensional: La emisora alemana Westdeutsche Rundfunk, por sugerencia mía, puso en marcha en 1979, dentro de un programa de televisión, un concurso de móviles perpetuos. Eramos muy escépticos. Calculábamos que recibiríamos cestas llenas de propuestas de inventores poco instruidos. Para nuestra sorpresa, sólo llegaron a la redacción unas 150. Los remitentes se tomaron en general el problema como un desafío a su fantasía y humor.

Un ejemplo típico es el “motor ascensional”. Un gran número de recipientes cuelgan, a distancias iguales, de una cinta transportadora que desliza, dispuesta verticalmente en el interior de un tanque de agua, sobre dos rodillos que giran con facilidad (*véase la figura 2*). Los recipientes, rígidos, están cerrados por una membrana flexible de la que cuelga un gran peso. Los de la parte derecha de la ilustración tienen un volumen mayor que los de la izquierda porque los pesos de las membranas tiran hacia fuera de ellas. Así, para un mismo peso, experimentan en el agua una fuerza ascensional mayor, según el principio de Arquímedes, y pondrán en movimiento el mecanismo en sentido contrario a las agu-



2. El peso G hace que el volumen del gas de los recipientes que suben sea mayor que el de los que bajan. Así se crea un empuje ascensional que mantiene en movimiento toda la cadena de recipientes. ¿Para siempre?



THOMAS BRAUN/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

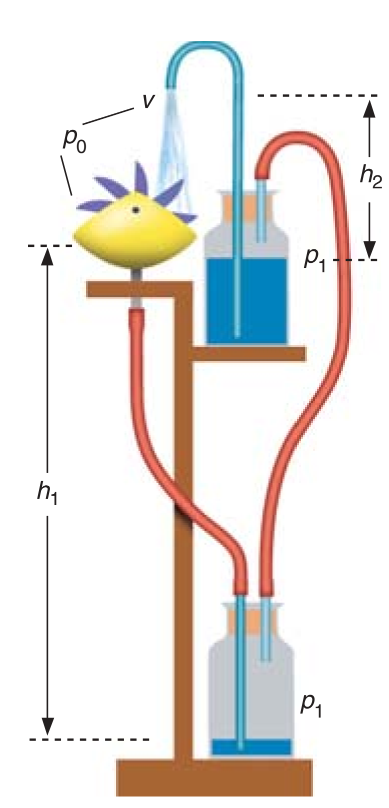
3. ¿Puede avanzar un cohete espacial como un flagelado en el agua, moviendo de un lado al otro alguna parte de su estructura? ¿Podría un perro salchicha, con una bola pesada atada a la cola, elevarse en el aire gracias a un fuerte movimiento?

Por desgracia, no hay móviles perpetuos

El motor ascensional rinde, por cada par de recipientes que sube y baja desde una profundidad h_2 hasta otra h_1 (desde h_1 hasta h_2, respectivamente), un trabajo $\rho g(h_2 - h_1)\,\Delta V = (p_2 - p_1)\Delta V$, ya que el que sube del par tiene un volumen interno mayor en $\Delta V = V_D - V_I$. (ρ es la densidad del agua, g la aceleración debida a la gravedad; la presión p crece linealmente con la profundidad h bajo la superficie: $p = p_0 + \rho g h$, donde ρ_0 es la presión atmosférica.) Pero justo esa cantidad de trabajo se pierde en otra parte: cuando pasa por abajo de un lado al otro del montaje, el peso tiene que ejercer un trabajo $p_2\Delta V$ en contra de la presión p_2 a profundidad h_2 para agrandar el volumen del recipiente en una cantidad ΔV. En cambio, cuando pasa de un lado al otro por arriba sólo se gana un trabajo menor, $-p_1\Delta V$, por compresión del volumen del recipiente. El mecanismo podría hasta funcionar sin pérdidas si el agua se apartara ante la proa de cada recipiente sin oponer la resistencia que frena el movimiento. Además, el gas comprimido de los recipientes que descienden está más caliente que el gas expandido de los que ascienden. Si el aislamiento térmico de los recipientes no es perfecto, la igualación de temperaturas hará que se pierda energía aprovechable. Ambos efectos acabarán por detener el "motor", aun cuando parta de un cierto desequilibrio y se mueva un cierto tiempo.

Si funcionara el **motor centrífugo**, no sólo violaría el principio de conservación de la energía, sino también el de conservación del momento. Generaría constantemente un impulso sin retroceso. El fallo reside en una confusión ilícita de los sistemas de referencia. La fuerza centrífuga descrita sólo existe en el sistema que gira con la barra impulsora. Pero su descomposición en dos componentes, en una fuerza de empuje y en otra transversal, se interpreta desde un sistema solidario al cohete, en el cual ni tan siquiera existe. Lo que no está, no puede causar ningún efecto: ¡un burdo error por el que un estudiante de física o ingeniería suspendería su examen!

El principio que rige el **móvil de Herón** es el de una "fuente de Herón". La circulación del agua no es más que un simulacro. En el manguito de la derecha no fluye agua alguna; sólo hay aire que transmite la sobrepresión $p_1 = p_0 + \rho g h_1$ desde el frasco inferior al superior (p_0 presión atmosférica, ρ densidad del agua, g aceleración debida a la gravedad, h_1 altura de la columna de agua de la izquierda). Esta sobrepresión p_1 en el frasco superior empuja el agua, que sale (en el caso de una corriente sin resistencia) a una velocidad $v = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$ del tubo de cristal acodado, a h_2 centímetros sobre la superficie del agua, y cuya caída pone en movimiento la pequeña turbina. En el momento en que toda el agua haya salido del frasco superior, dejará de trabajar el móvil de Herón.



4. La circulación del agua parece impulsar eternamente el molinete

jas del reloj. Los recipientes que, arriba y abajo, dan una vuelta alrededor de los rodillos intercambian sus funciones. De este modo se mantiene el movimiento de por vida: un móvil perpetuo.

El motor centrífugo. En la edición de abril de 1977 de *Physikalischen Blätter*, la revista de la *Sociedad Alemana de Física*, se describió "un nuevo método de impulsión de cuerpos volantes espaciales". Con ayuda de una excéntrica, un motor imparte a una barra, que lleva adherida una masa *m* en su extremo, una oscilación periódica que la aleja un determinado ángulo α, hacia la izquierda y hacia la derecha, del eje del cohete (*véase la figura 3*). La masa del extremo de la barra experimenta supuestamente una fuerza centrífuga, en la dirección de la barra. Las componentes de esa fuerza a lo largo del eje del cohete propulsan la nave; en el promedio temporal, las perpendiculares al eje se compensan. Aumentando la velocidad angular o la longitud de la barra, se incrementa cuanto se quiera el empuje, afirmaba el inventor, quien ponía de relieve que este motor espacial trabajaría sin expeler masa, limpiamente y con un gran rendimiento. Los movimientos transversales agitarían de mala manera a los pasajeros; sería un poco incómodo viajar en semejante nave espacial. Se remediaría el inconveniente con dotar al motor de dos barras que se movieran siempre en sentidos opuestos.

El móvil de Herón: Usted mismo puede montar este móvil perpetuo con un molinete de agua, dos vasos de lavado del laboratorio de química, dos manguitos de goma y unos tubos de vidrio (*véase la figura 4*).

En la demostración del artilugio, los espectadores ven que el agua cae, pone en marcha el molinete y desaparece por el manguito de la izquierda. El maestro de ceremonias afirmará que el manguito derecho cierra el circuito de agua. El mecanismo sería, pues, un móvil perpetuo.

Una pequeña broma para finalizar. Escriba en ambas caras de un papelillo "mire en el dorso, por favor" y déjelo caer al suelo de forma que llame la atención de quienes pasen por allí. Siempre habrá algún curioso que se agache, lea el mensaje y dé la vuelta al billete. Quizá le haga gracia y desee gastarles a otros la broma. El juego seguirá indefinidamente.

El billete es una máquina de movimiento perpetuo. Naturalmente, no genera ninguna energía. Pero vive de una fuente de energía inagotable, o casi: la curiosidad humana.

THOMAS BRAUN/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

LIBROS

Naturaleza

Sus leyes e historia

DER BEGRIFF DER PHYSIS BEI GALEN VOR DEM HINTERGRUND SEINER VORGÄNGER, por Franjo Kovacic. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2001. **ALEXANDER OF AFRODISIAS ON THE COSMOS,** por Charles Genequand. Brill; Leiden, 2001.

NATURAL PARTICULARS. NATURE AND THE DISCIPLINES IN RENAISSANCE EUROPE. Dirigido por Anthony Grafton y Nancy Siraisi. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts; 2000. **KAUSALITÄT UND NATURGESETZ IN DER FRÜHEN NEUZEIT.** Coordinado por Andreas Hüttermann. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2001. **ISAAC BEECKMAN, ATOMISTA E LETTORE CRITICO DI LUCREZIO,** por Benedetto Gemelli. Leo S. Olschki editore; Florencia, 2001.

BETWEEN LEIBNIZ, NEWTON, AND KANT. PHILOSOPHY AND SCIENCE IN THE EIGHTEENTH CENTURY. Dirigido por Wolfgang Lefèvre. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2001. **BOTANOPHILIA IN EIGHTEENTH-CENTURY FRANCE. THE SPIRIT OF THE ENLIGHTENMENT,** por Roger L. Williams. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2001.

LA SFIDA DELLA MODERNITÀ. ATTI DEL CONVEGNO INTERNAZIONALE DI STUDI NEL BICENTENARIO DELLA MORTE DI LAZZARO SPALLANZANI. Edición preparada por Walter Bernardi y Marta Stefani. Leo S. Olschki editore; Florencia, 2000. **HEGEL UND DIE LEBENSWISSENSCHAFTEN.** Edición preparada por Olaf Breidbach y Dietrich von Engelhardt. VWB-Verlag für Wissenschaft und Bildung; Berlín, 2002.

Con el concepto de naturaleza ha ocurrido un fenómeno curioso. Nacido del seno de la filosofía, ha vuelto a ella tras un fructífero periplo por la historia de la ciencia. No queremos decir, obviamente, que la física (*physis* es naturaleza en griego) haya perdido su carácter de ciencia exacta, ni que la búsqueda de una teoría del todo, de la naturaleza en su radicalidad última, haya dejado de atraer a teóricos potentes. Nuestra afirmación es de alcance más modesto. Queremos indicar lisa y llanamente que las reflexiones de los presocráticos de la Magna Grecia, desarrolladas y transformadas luego a lo largo de siglos, vuelven a ocupar un lugar en el debate filosófico.

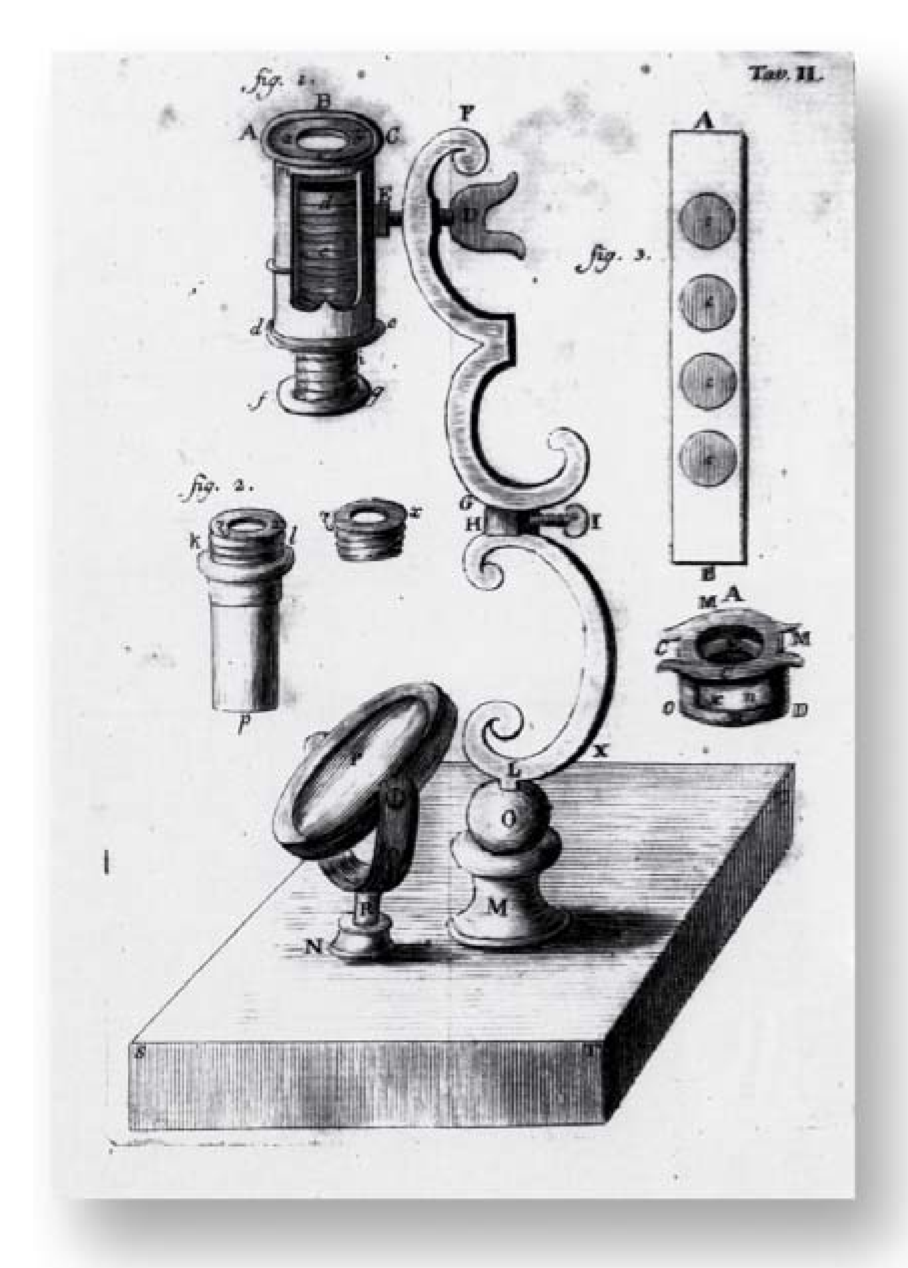
En la *Odisea* hace su entrada el término para identificar una planta. Muy pronto, la *physis* designará el sustrato que subyace bajo todo cuanto aparece, asociada al principio del movimiento y del cambio. En cierto sentido, se trata de algo inmanente y trascendente los seres, vivos o inertes. Extenderá su significado para indicar la estructura de las cosas, su proporcionalidad matemática y su logos, hablemos de la realidad de los seres bajo la capa del cielo o del universo entero (*Der Begriff der Physis bei Galen vor dem Hintergrund seiner Vorgänger* y *Alexander of Afrodisias on the Cosmos*).

En Galeno el concepto de naturaleza es, todavía, científico (médico) y filosófico. Ocupa, además, un lugar central en su doctrina. Influido por el *Timeo* platónico, apela al demiurgo para explicar la formación de las partes del cuerpo. Demiurgo y naturaleza son lo mismo. También lo es demiurgo y nous. En razón de ese carácter bifronte, la naturaleza no puede operar nada que vaya contra el orden establecido de las cosas. (Sólo el dios Asclepio puede curar las heridas.).

Aborda la naturaleza, considerada estructura y principio de cambio, desde una óptica biológica. Le da un enfoque causal en sus escritos sobre embriología y el alma. En la formación del feto, expone, el esperma masculino y el "femenino" proceden de todas las partes del cuerpo y actúan por mediación de una suerte de impulso o hálito (el pneuma). Atribuía al alma la forma del cuerpo, donde por alma entendía la mezcla de las cualidades. En ese marco, la *physis* de los seres vivos sigue un plan regulador general, anterior a sus partes. Y puesto que los organismos sólo pueden originarse a partir de otros organismos, habrá siempre una *physis* viva y operativa. Una vez constituido el individuo, la naturaleza se torna principio inmanente del movimiento, metabolismo y conservación.

Si Galeno fue un abierto receptor de múltiples influencias, su contemporáneo y adversario Alejandro de Afrodisias se atiene a la glosa exhaustiva de los tratados aristotélicos (*Metafísicos, Analíticos primeros*, *Tópicos, Sobre los sentidos* y *Meteorológicos*). Polemiza con los estoicos (*Sobre el destino* y *Sobre la mezcla*) y redacta, entre otros, un elenco de ensayos sobre cuestiones particulares. La sombra de Alejandro cubre la tradición medieval y llega al Renacimiento. En lengua árabe nos ha llegado su visión de la naturaleza, resumida en el texto cosmológico que Charles Genequand acaba de presentar en espléndida edición crítica, que completa una deficiente anterior: el *Maqalat al-Iskandar al-Afrodisi fi al-qawl fi Mabadi al-Kull bi-basab ray Aristatalis al-faylsuf*. El agente que mantiene unido al mundo supra e infralunar, sostiene aquí, es el movimiento regular y eterno de los cielos y el poder que emana del mismo.

Convergen en el *Mabadi* de Alejandro ideas extraídas del estagirita, de Teofrasto y del pseudoaristotélico *De mundo*. Así, distingue una doble fuente de movimiento: una interna (el alma y la naturaleza) y otra externa (el objeto de deseo o propósito del movimiento). Ambas causas, eficiente la primera y final la segunda, se complementan entre sí y deben darse simultáneas. Se aplica ello a los seres animados (objetos astronómicos incluidos); en



Microscopio simple de Wilson-Cuff. Presenta el soporte en "s" característico. Permitía la observación de arriba abajo

los cuerpos inertes admite un impulso que deriva de su constitución y los inclina hacia su lugar natural. No existe diferencia entre alma y naturaleza en los cuerpos celestes. Una idea que sólo desaparecerá del panorama científico cuando Kepler sustituya tal animación por fuerzas.

A entender el concepto de naturaleza que hereda el autor de las famosas leyes de los movimientos planetarios nos ayuda la gavilla de ensayos que componen *Natural Particulars*, una visión actualizada del saber renacentista. Desde distintas ópticas se propone convencernos de que no podemos acercarnos a esa idea cardinal sin dominar las distintas disciplinas que de ella se ocupan. Unas disciplinas que parten del legado clásico, transformado o depurado por escolásticos y humanistas, crecen con la acumulación de nuevos datos y observaciones (geográficas, antropológicas, zoológicas, botánicas y anatómicas) y adoptan unos medios de difusión emergentes, como pueden ser los libros impresos, teatros anatómicos o las ilustraciones artísticas. Sin olvidar la aportación de la minería y el recurso a los alambiques.

En su aproximación renacentista a la naturaleza conviven y se entremezclan los sistemas filosóficos de múltiple origen y escuelas (aristotélicas, platónicas, atomistas), el galenismo reformado o humanista, las lucubraciones esotéricas y las ensoñaciones alquimistas que buscan los últimos componentes de la materia (llamados *prima naturalia*). En numerosas ocasiones será acicate de ellas el crisol de la observación, aupada a un primer plano por los cultivadores de la historia natural. Atiende ésta a los particulares, que constituyen el núcleo central de los *Problemata*, traducidos por Teodoro de Gaza hacia 1473, y de los escritos naturalistas de Aristóteles. Los problemas en cuestión, cuya idea puede atribuirse al estagirita, comprendían preguntas y respuestas sobre las causas de los procesos naturales.

Se trata, por lo demás, de una corriente empírica que hunde sus raíces en el Medievo del sur de Europa. La propia matematización de la naturaleza, bandera de la Revolución Científica, prosigue una tradición secular, más norteña, en la que distinguimos la asimilación de Arquímedes y las aportaciones de Nicolás de Oresme o de los calculadores de Oxford. Los médicos de los siglos XIII y comienzos del XIV conjugaban ya la exégesis de los textos de autoridad (Hipócrates, Galeno y Avicena) con la contrastación empírica. Aparece la disección en cirugía de la mano de Mondino de Liuzzi. En la centuria humanista se acentúa este interés por los casos individuales, las especies morbosas y las terapias corroboradas, que demanda un conocimiento más seguro de los fenómenos naturales.

Quizá la primera quiebra del mundo conceptual renacentista venga con el debilitamiento de la noción de causa (*Kausalität und Naturgesetz in der frühen Neuzeit*). Con ligeros añadidos y matizaciones, las cuatro causas aristotélicas (eficiente, material, formal y final) constituían la explicación cabal de la naturaleza de un objeto o de un proceso. Desde principios del siglo XVII, con Galileo, se inicia un tránsito hacia la exclusión de las mismas del razonamiento científico, salvo la causa eficiente. Pasan a ocupar el

primer plano las ideas de fuerza de atracción y presión, de inercia. Y se introducen, o determinan, conceptos novedosos como el de cantidad de movimiento, en Descartes, y el de *vis viva* (multiplicación de la masa por la velocidad al cuadrado), en Leibniz. Para conocer el orden y la regularidad que se advierte en la naturaleza, insistirá Newton en que sustituyamos las formas sustanciales por leyes matemáticas.

Desde muy pronto, las leyes del movimiento se convierten en reflejo inmediato de las leyes de la naturaleza. Por leyes suelen designarse normas generales y fundamentales que admiten una expresión matemática. Lo irregular, así el movimiento de los cometas, no puede someterse a ley. Del concepto de ley universal se pasa de inmediato al circunscrito de ley óptica, ley mecánica, ley de la refracción, leyes de la vegetación y la vida. En cuanto inscritas por Dios, se consideran inviolables.

Dn. D. RUDOLPHI JACOBI CAMERARII,
Med. D. & P.P.
Acad. Cæsareo - Leopold. N. C. Colleg. d. HECT. II.
Ad
Dn. D. MICHAELEM BERNARDUM VALENTINI,
Prof. Giessenum & Curios. THESSALUM
De
SEXU PLANTARUM
EPISTOLA.

Encabezamiento del escrito en que R. J. Camerer expone sus ensayos sobre fecundación vegetal

Pero, ¿qué es lo que se mueve? La doctrina atomista reverdece en muchos planteamientos (*Isaac Beeckman, atomista e lettore critico di Lucrezio*). A través de las páginas del diario y la correspondencia de Beeckman con Descartes, Gassendi o Mersenne, asistimos a la búsqueda de los corpúsculos mínimos, indivisibles, que se suponen apuntalan la estructura de la materia y dan cuenta, si se tercia, de los planetas o de la fisiología del dolor.

Sabido es que una de las construcciones mejor elaboradas del atomismo concierne al modelo de

Tierra comparada

THE EARTH IN CONTEXT, por David M. Harland. Springer-Praxis; Chichester, 2001.

Excelentemente presentado por la cuidadosa editorial británica, el libro atrae desde el primer momento por su título y su contenido. Ofrece un panorama de la Tierra en el conjunto del sistema solar, destacando aspectos homologables entre el planeta en que vivimos y los otros. En este sentido, constituye un muy bien documentado estudio comparativo de los componentes rocosos del sistema y los satélites más conspicuos de los gaseosos. Pocos análisis conjuntos de este tipo se han realizado, con vistas al gran público, tan ilustrativos como el de Harland.

Puede extrañar la relativamente escasa extensión que dedica a la Tierra (27 págs.) comparada con Marte (55 págs.), o incluso con Venus (34 págs.). Ello dificulta la consideración de nuestro planeta no ya como modelo, sino tan siquiera como punto de referencia comparativo. Más bien es en el estudio de otros planetas, singularmente Marte y Venus, donde se hacen algunas alusiones relativas a ciertas concomitancias con el nuestro. En este sentido, *The Earth in Context* es más un análisis de la litología de los planetas que una presentación de la Tierra en el "contexto" del conjunto.

Un hecho se hace preciso constatar desde el primer momento: Harland sólo busca el comparatismo de la superficie sólida de los planetas o los satélites rocosos. Por ello, aunque existen sendos capítulos dedicados a Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, apenas se refiere a ellos más que en una presentación de dos o tres páginas, y dedica el resto del apartado a estudiar la superficie de sus satélites más conspicuos. El orden puede resultar curioso: la Tierra, la Luna, Marte, Venus, Mercurio, la Tierra precámbrica, Júpiter, Urano y Neptuno. El capítulo dedicado a la Tierra precámbrica puede sorprender por el lugar que ocupa, que no aparece justificado por el autor: es preciso adivinar que sirve para explicar el origen de las placas continentales en nuestro planeta, que pueden constituir —el autor no va más lejos— su rasgo distintivo.

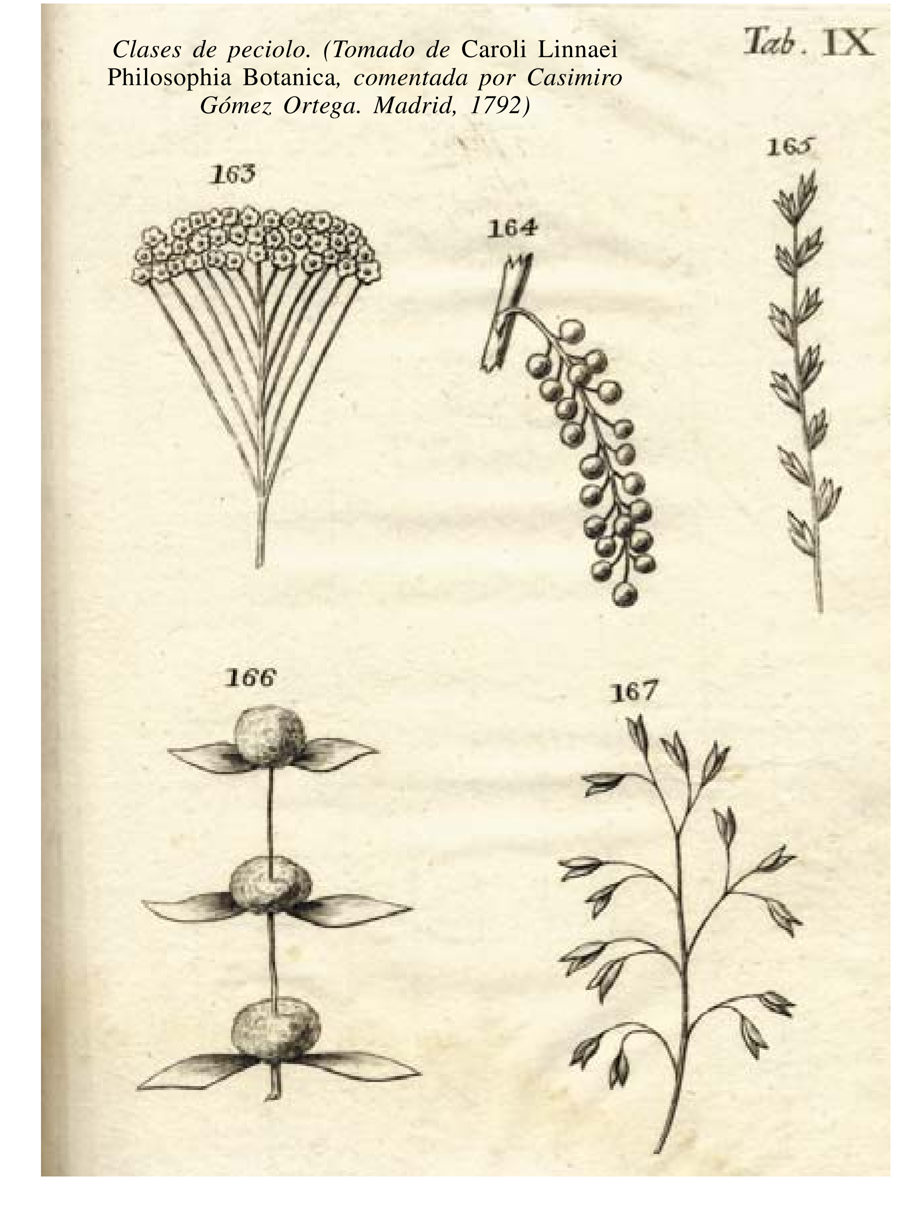
En este punto, resulta necesario advertir que a Harland no le interesa el análisis de la estructura interna de los planetas. En el caso de la Tierra, que es aquel en que "penetra" más, se queda en la capa de Mohorovic. En los demás casos, se limita casi exclusivamente a la litosfera: aspecto que sí es objeto de un estudio tan detallado como bien documentado. Por tanto, es inevitable echar en falta en el trabajo de Harland un estudio de la estructura total, que hubiera completado nuestro conocimiento. Por el contrario, diríase que su condición de historiador de la ciencia —especialista en planetología— le traiciona en forma de referencias inútiles al pasado. Parece que no resulta necesario comenzar el estudio de Marte con Huygens, el de Venus con Pickering, el de Júpiter con Galileo, etc.

Un capítulo extra, pero sugestivo, es el final: *Life and Death*, relativo al origen de la vida (en la Tierra) y a los peligros, internos (catástrofes) o externos (colisiones) que nos acechan. Espléndidas ilustraciones, aunque todas en blanco y negro, así como dos útiles apéndices y un no menos útil glosario de 350 términos enriquecen un libro escrito en un espléndido ingles, británico y académico.

—JOSÉ LUIS COMELLAS

atracción magnética. Para explicar "magnes quomodo trahat ferrum" (de qué modo atrae el imán al hierro) esgrimen la doctrina de la "correspondencia" entre los poros del imán y los del hierro: se produce la atracción, cuando el "espíritu" que emana del imán penetra por la zona idónea del hierro; se da la repulsión, si el fluido entra por la parte opuesta. Ese efluvio magnético es espíritu corpóreo. (Gilbert lo creía incorpóreo.) Extendiendo la teoría, los planetas vendrían a ser como imanes en su movimiento en torno al Sol; pese a la fuerza atractiva no chocan contra él porque media interpuesto otro fluido, el lumen.

La filosofía y la ciencia se muestran estrechamente asociadas a lo largo del siglo XVII. Vinculación que experimentará una fase de ruptura en la segunda mitad del siguiente (*Between Leibniz, Newton, and Kant. Philosophy and Science in the Eighteenth Century*). La asociación comporta la búsqueda de un apuntalamiento epistemológico de la física. En los sistemas filosóficos que emergen han de tener cabida, además, las nuevas ramas de la matemática (álgebra, geometría analítica, cálculo diferencial, etcétera) y herramientas teoréticas generales (deducción e inducción). Venía ello facilitado por la potencia intelectual de quienes se desenvolvían con rigor lo mismo en el campo de la ciencia que en el de la especulación filosófica.



Clases de peciolo. (Tomado de Caroli Linnaei Philosophia Botanica*, comentada por Casimiro Gómez Ortega. Madrid, 1792)*

De la fructífera interacción entre filosofía, matemática y mecánica partió el soporte para la confianza en lograr una integración, en una metafísica última, de todas las áreas del conocimiento, que no se logró. Ante tal frustración, desde mediados del siglo XVIII se asiste a una aversión creciente contra los sistemas ontológicamente fundados. El equilibrio entre filosofía, matemática y física, establecido en la época de Newton y Leibniz perdió su estabilidad. Si, a la postre, Cullen simboliza el escepticismo ante la metafísica, Kant emprende una crítica radical de sus fundamentos epistemológicos.

Había sido decisivo en el nuevo rumbo el programa de Euler de una mecánica racional. Abandonó los fundamentos ontológicos en favor de la axiomatización. El principio de la acción mínima y otros principios analíticos comenzaron a aplicarse a problemas concretos para generalizarse a un abanico más amplio de fenómenos. Y cuando esta explicación se demostró útil para mejorar la organización deductiva de su mecánica racional, Euler elevó esos principios a axiomas formales.

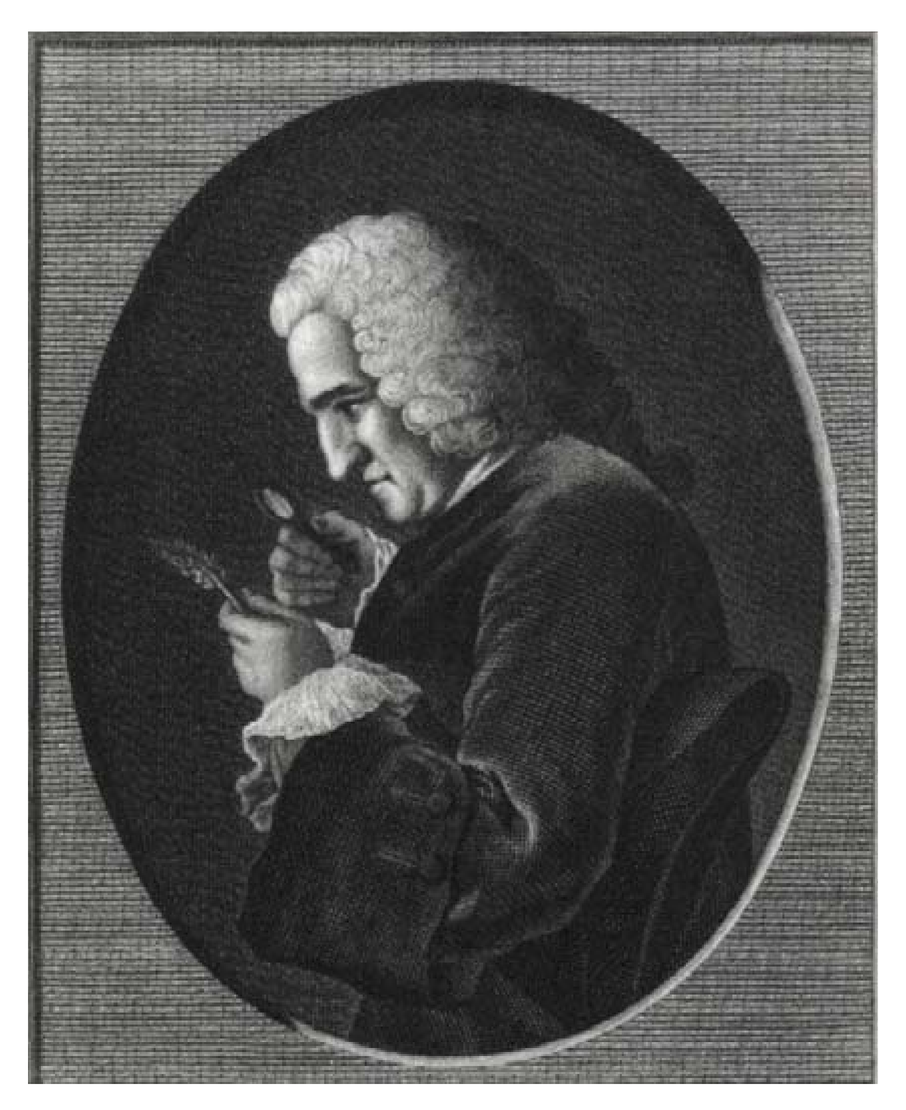
Lo que la axiomatización era a la mecánica (terrestre y astronómica) quiso ser la clasificación a la botánica, zoología y geología en las postrimerías del siglo XVII y a lo largo del XVIII. Nomenclatura y clasificación se pretendieron universales. Una suerte de leyes de segundo nivel, que recogieran el orden de la naturaleza (*Botanophilia in Eighteenth-Century France. The Spirit of the Enlightenment*). No era fácil semejante propósito en un momento en que el elenco de especies conocidas se multiplicaba por días. La clave que permitió a Linneo pergeñar su sistema de clasificación fue el descubrimiento de la sexualidad de las plantas.

Costó bastante aceptar el fenómeno de la reproducción sexual en los vegetales, si consideramos que las primeras indicaciones arrancaban de Teofrasto, albacea de Aristóteles, e incluso antes. A finales del siglo XVII Nehemiah Grew y John Ray sugerían una analogía entre la sexualidad vegetal y la animal, fundándose en el hermafroditismo de ciertos invertebrados, mientras Rudolf Jacob Camerer iba más lejos,

al experimentar con la fecundación del polen. En 1702 J.H. Burckhard le escribía a Leibniz que el carácter distintivo de las plantas no residía en la forma floral, ni en las raíces sino en los órganos de la fecundación y fructificación. Se sucedieron las pruebas a favor, en particular las obtenidas por Claude-Joseph Geoffroy. Sin embargo, la autoridad y el prestigio de que gozaba Joseph Pitton de Tournefort, contrario a dicha tesis, retrasó su aceptación. Además, los ensayos parecían invalidados por los helechos, que ni tenía flores ni anteras manifiestas, ni producían semillas.

Ninguno de los testimonios favorables tuvo la resonancia de la conferencia dictada por Sébastien Vaillant en el Jardín del Rey la mañana del 10 de junio de 1717 ante un público estudiantil. En un lenguaje vivaz, con metáforas atrevidas, expuso la estructura de los órganos sexuales y su función en la reproducción. Linneo, que conoció el texto, clasificó el reino vegetal atendiendo a la sexualidad. Repartió los géneros en 24 clases. Salvo en la última se agruparon todas bajo el epígrafe Nuptiae Publicae (Fanerógamas), es decir, plantas productoras de semillas con flores visibles. La clase 24 pertenecía a las Nuptiae clandestinae (Criptógamas), plantas cuyas flores eran invisibles, y que más tarde se comprobó que se reproducían por esporas. Pese al éxito de ese empeño, Bernard de Jussieu pugnó durante años por encontrar un definitivo método natural que, dejando fuera el esencialismo explícito en Linneo, reflejara el orden real de la naturaleza. Las leyes subyacentes.

Unas leyes que quizá cambiara la evolución de la propia naturaleza. En la Ilustración encuentra Dietrich von Engelhardt la plasmación de su tesis sobre la historicidad de la naturaleza (*La Sfida della Modernità* y *Hegel und die Lebenswissenschaften*). Introduce su origen en el marco de la emancipación política y científica, que se daría coetánea con la separación entre una cultura científica y una cultura humanística. Otros factores que intervendrían en la aparición de la aproximación histórica a la naturaleza serían la especialización, empirismo y método científico.



Bernard de Jussieu (1699-1776)

Con el término "evolución" se entendía hasta el siglo XVIII una teoría de la generación según la cual todos los embriones se formaban ya en el inicio de la creación y su desarrollo venía activado a través de la procreación; a esta teoría preformacionista se contrapuso la teoría epigenética. (De la generación espontánea y de la individualidad y permanencia biológica se ocupan in extenso otras colaboraciones de *La Sfida*.) Pero al doblar el siglo XIX el concepto de evolución adquiere un nuevo sentido, que afecta no sólo al organismo, sino también a la sociedad y a la propia historia.

Para Hegel, la naturaleza, un sistema de estadios sucesivos o niveles, constituye un momento de la vida del Absoluto, al que podemos identificar con la totalidad. Aunque él sitúa la naturaleza en los límites de la dialéctica, muy pronto recibirá un significado histórico y evolutivo. También naturaleza y espíritu se contraponen dialécticamente. El hombre, antes que espíritu, es organismo sometido a las leyes de la biología. La primera vez que emplea la palabra "organismo" (en su *Systementwürfen*, entre 1803 y 1804), lo asocia a la idea de un todo, que muestra una unidad de lo interno y externo; los organismos parciales constituidos por el sistema circulatorio, nervioso, etcétera se integran en el organismo general del cuerpo. Organismo aparece, pues, en oposición a "mecanismo" o "quimismo", que no presentan a la postre ninguna unidad natural.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Tabúes de intimidad

En una cultura temerosa de los espíritus, la de los paranoimos, cada mujer adulta tiene una cabaña propia donde sólo ella puede orar. Estas capillas se diferencian en que cada mujer las marca con símbolos de su devoción particular. Según los paranoimos, si la mujer A penetra en el templo de la mujer B, éste resultará "debilitado" por la profanación; las oraciones que B haga en él perderán fuerza, mientras que las de A serán más potentes.

Por ello, cuando una mujer sospecha que otra ha entrado en su cabaña, está obligada a golpear a la intrusa con un bastón ritual. Las sospechas han de proceder de acusaciones de terceras, nunca por observación directa. Pueden ser varias las mujeres que acusen a otra.

Si la mujer C acusa a A de haber penetrado en la capilla de B, ésta deberá golpear a A con el bastón. En el momento de pegarle, B le dirá a A que fue acusada por C. (C podría ser una de varias acusadoras.) B tiene la obligación de ser sincera en este punto. Si la acusación es falsa, A habrá de golpear a C. Si la acusación es verdadera, A no pegará a C, tanto por tradición, como porque C podría aportar pruebas, lo que entrañaría el destierro de A. Dado que estas intrusiones provocan grandes resquemores, la mayoría de las mujeres evitan cometerlas.

Una antropóloga estudiosa de los tabúes de intimidad visitó recientemente a los paranoimos, pero no conocía su idioma. Nuestro trabajo consiste en interpretar las anotaciones de su diario de campo, para determinar quién acusó y quién fue acusada, y si es posible, quién ha sido culpable de intrusión. He aquí las anotaciones:

C habla con F
B habla con E
A habla con F
F habla con A
E habla con B
A habla con B
E le pega a A
A le pega a C
A le pega a B
B le pega a A
F le pega a D
A le pega a E
B le pega a C
C le pega a A

En las figuras vemos un problema preliminar, de entrenamiento; la solución se expone inmediatamente debajo.

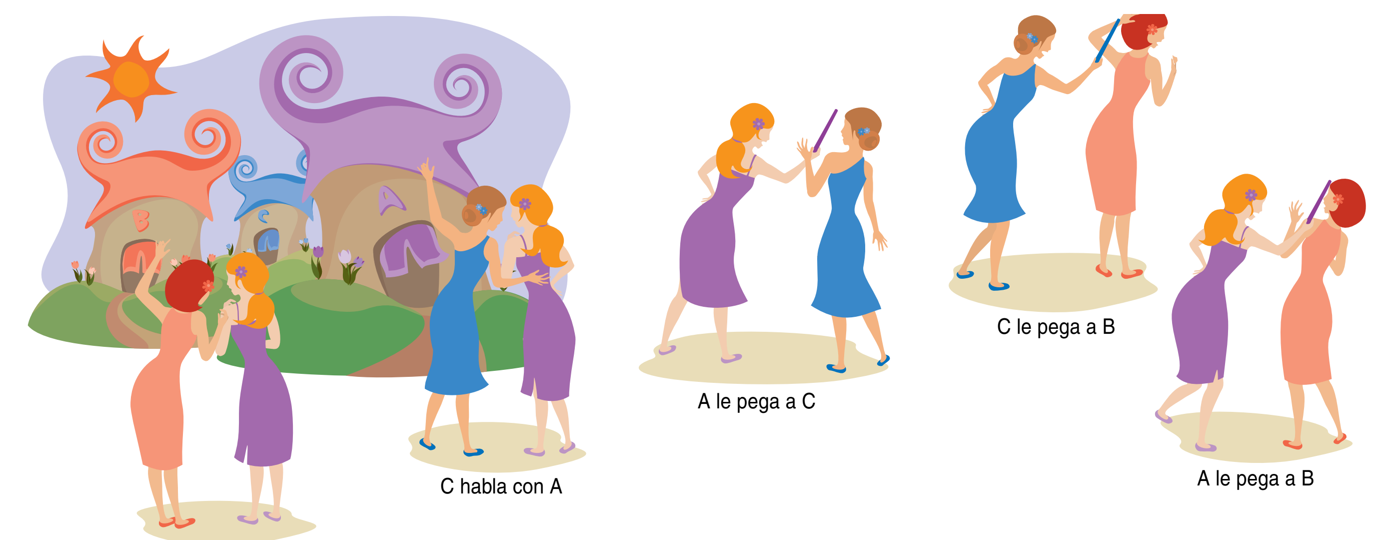
Solución del problema del mes pasado:

Si los defensas pueden empezar el partido a por lo menos tres espacios del delantero, ganarán siempre. Pero si han de comenzar en el fondo sur, es el delantero quien puede ganar siempre. Encontrará una explicación completa en www.investigacionyciencia.es.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

PROBLEMA PRELIMINAR: ¿QUIEN SE COLO EN CABAÑA AJENA?



SARA CHEN

Solución del problema preliminar: B acusó a C de haber entrado en la cabaña de A, y C acusó a B de lo mismo. Pero, en realidad, sólo fue B quien lo hizo.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LASER EN EL KILOMETRO FINAL, por Anthony Acampora

Los modernos servicios multimedia en banda ancha pueden llegar directamente a viviendas y empresas por medio de láseres infrarrojos de corto alcance.

NARIZ DEL TOPO, por Kenneth C. Catania

El topo de nariz estrellada posee la que muy probablemente sea la nariz más rápida y más fantástica del mundo.

LOS ENSAYOS DE UN CORAZON ARTIFICIAL, por Steve Ditlea

Transcurrido un año desde que los médicos comenzaron a implantar el AbioCor en pacientes moribundos, las perspectivas de este corazón artificial son inciertas.

ROBOCUP: LA COPA DEL MUNDO DE FUTBOL ROBOTICO, por Hiroaki Kitano y Minoru Asada

Tras el éxito de Deep Blue *sobre Gary Kasparov, un campeonato de fútbol con robots. Y un objetivo, ganar al campeón del mundo en 2050.*

DESCUBRIR LA SUPERSIMETRIA, por Jan Jolie

Un fenómeno esquivo y extraño conocido como supersimetría fue concebido para la física de las partículas elementales, pero ha aparecido en núcleos de platino y oro.

TERAPIA GLUCIDICA, por Thomas Maeder

Los azúcares desempeñan funciones críticas en muchas de las actividades celulares y también en la enfermedad. Aunque el estudio de esas actividades va por detrás de la investigación sobre genes y proteínas, las distancias se van acortando. Los descubrimientos prometen ya una nueva generación de fármacos.

AGUJEROS NEGROS ACUSTICOS, por Renaud Parentani

Puesto que la propagación del sonido en un fluido en movimiento es análoga a la de la luz en un espacio-tiempo curvo, los físicos han ideado "agujeros negros acústicos" con propiedades muy parecidas a las de los agujeros negros astronómicos.

DINOSAURIOS GIGANTES DE LA PATAGONIA, por Leonardo Salgado y Rodolfo Coria

Hace millones de años, los dinosaurios se enseñorearon del planeta. Los saurópodos prosperaron en la Patagonia argentina, dejando innumerables restos óseos y huevos que dan testimonio de su diversidad y comportamiento.

